



**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**KARAKTERISASI UNJUK KERJA *BURNER GAS TYPE PARTIALLY PREMIXED* BERBAHAN BAKAR SYNGAS BIOMASSA SERBUK KAYU DENGAN VARIASI *PRIMARY* DAN *SECONDARY AIR***

**FITRIA RACHMAWATI  
NRP 2113 105 038**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**



**FINAL PROJECT - TM 141585**

**PERFORMANCE CHARACTERIZATION OF BURNER GAS  
TYPE PARTIALLY PREMIXED BIOMASS SYNGAS POWDER  
WOOD FUEL BASED WITH VARIATION OF PRIMARY AND  
SECONDARY AIR**

**FITRIA RACHMAWATI  
NRP 2113 105 038**

**Academic Supervisor  
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016**

**KARAKTERISASI UNJUK KERJA *BURNER GAS TYPE  
PARTIALLY PREMIXED* BERBAHAN BAKAR *SYNGAS*  
BIOMASSA SERBUK KAYU DENGAN VARIASI  
*PRIMARY* DAN *SECONDARY AIR***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**FITRIA RACHMAWATI**

Nrp. 2113 105 038

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT  
(NIP. 197301161997021001) .....(Pembimbing)
2. Ary Bachtiar K P, ST, MT, PhD  
(NIP. 197105241997021001) .....(Penguji I)
3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT  
(NIP. 197104051997021001) .....(Penguji II)
4. Bambang Arip D., ST, M. Eng, PhD  
(NIP. 197804012002121001) .....(Penguji III)

**SURABAYA  
JANUARI, 2016**

**KARAKTERISASI UNJUK KERJA *BURNER GAS TYPE PARTIALLY PREMIXED* BERBAHAN BAKAR SYNGAS BIOMASSA SERBUK KAYU DENGAN VARIASI *PRIMARY* DAN *SECONDARY AIR***

**Nama Mahasiswa : Fitria Rachmawati**  
**NRP : 2113105038**  
**Jurusan : S1 Teknik Mesin FTI – ITS**  
**Dosen pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, ST. MT.**

**ABSTRAK**

*Saat ini biomassa serbuk kayu menjadi salah satu sumber energi alternatif yang cukup melimpah namun banyak menimbulkan masalah dalam penanganannya bila dibiarkan menumpuk, membusuk dan dibakar yang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan. Sumber energi alternatif tersebut dapat dimanfaatkan dalam dunia industri. Salah satu industri yang memanfaatkan energi biomassa adalah industri pembuatan karbon aktif. Dalam pembuatan karbon aktif dibutuhkan suhu pemanasan atau pembakaran yang tinggi dan memerlukan proses lanjutan untuk meningkatkan nilai kalor pada gasifikasi.*

*Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar Teknik Mesin, ITS. Burner ini untuk proses pembuatan karbon aktif dengan bahan bakar syngas biomassa serbuk kayu. Metode yang digunakan adalah dengan pengaturan variasi penambahan *primary* dan *secondary air* dengan variasi  $\dot{m}_{\text{primary}}$  sebesar 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03 (kg/s) dan  $\dot{m}_{\text{secondary}}$  sebesar 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08 (kg/s) yang sumber udaranya dihasilkan oleh blower. Tipe blower yang digunakan adalah blower sentrifugal. Cara memvariasikan *primary* dan *secondary air* ini dengan cara mengatur tegangan voltage regulator dan tekanan. Variasi tekanan yang digunakan adalah 0,2 bar sampai 1 bar dengan kenaikan 0,2 bar. Kemudian*

diperoleh perbedaan ketinggian red water yaitu  $\Delta l$  pada masing-masing inclined manometer syngas dan udara.

Dari penelitian ini didapatkan burner yang memiliki temperatur tertinggi sebesar  $478^{\circ}\text{C}$  dengan perbandingan udara  $\dot{m}_{\text{primary}}=0,015 \text{ kg/s}$  dan  $\dot{m}_{\text{secondary}}=0,06 \text{ kg/s}$  pada tekanan 1 bar, Daya burner tertinggi terdapat pada posisi dengan tekanan syngas 1 bar pada perbandingan udara  $\dot{m}_{\text{primary}}=0,015 \text{ kg/s}$  dan  $\dot{m}_{\text{secondary}}=0,07 \text{ kg/s}$  sebesar  $141,6452 \text{ kW}$ ., SFC tertinggi terdapat pada posisi perbandingan udara  $\dot{m}_{\text{primary}}=0,025 \text{ kg/s}$  dan  $\dot{m}_{\text{secondary}}=0,05 \text{ kg/s}$ , dan tekanan 1 bar yaitu sebesar  $1,0592 \text{ kg/(kWh)}$ ., dan Efisiensi burner tertinggi terdapat pada posisi perbandingan udara  $\dot{m}_{\text{primary}}=0,015 \text{ kg/s}$  dan  $\dot{m}_{\text{secondary}}=0,06 \text{ kg/s}$  dan tekanan 0,2 bar, yaitu sebesar 0,3930 atau 39,30% serta variasi untuk unjuk kerja burner gas type partially premixed terbaik adalah dengan perbandingan udara  $\dot{m}_{\text{primary}}=0,015 \text{ kg/s}$  dan  $\dot{m}_{\text{secondary}}=0,07 \text{ kg/s}$  serta visualisasi api terbaik pada posisi perbandingan udara  $\dot{m}_{\text{primary}}=0,015 \text{ kg/s}$  dan  $\dot{m}_{\text{secondary}}=0,06 \text{ kg/s}$ .

**Kata kunci:** burner, biomassa, primary and secondary air, serbuk kayu, syngas , partially premixed.

**PERFORMANCE CHARACTERIZATION OF BURNER GAS  
TYPE PARTIALLY PREMIXED BIOMASS SYNGAS  
POWDER WOOD FUEL BASED WITH VARIATION OF  
PRIMARY AND SECONDARY AIR**

**Student name** : Fitria Rachmawati  
**NRP** : 2113105038  
**Major** : Bachelor of Mechanical Engineering FTI-ITS  
**Supervisor** : Dr. Bambang Sudarmanta, ST. MT.

**ABSTRACT**

*In this day currently sawdust biomass become one of alternative energy sources are abundant yet given rise of problems in handling if allowed to accumulate dormant, decaying and burnt which have negative impact on the environment. That alternative energy sources can be utilized in the industrial world. One of the industries which using biomass energy is the industrial manufacture thats make activated carbon. On the process of making activated carbon required heating or high combustion temperature and requires a continued process to improve the calorific value of the gasification.*

*This research was conducted at Mechanical Engineering Laboratory of Combustion and Fuels, ITS. This burner for the process of making activated carbon with sawdust biomass syngas fuel. The method is using addition of setting variations primary and secondary air with variation of  $\dot{m}_{\text{primary}}$  such as ; 0.01; 0,015; 0.02; 0,025; 0.03 (kg / s) and  $\dot{m}_{\text{secondary}}$  0.04; 0.05; 0.06; 0.07; 0.08 (kg / s) which is the air source produced by a blower. Blower-type that using in this research is centrifugal blower. To vary the primary and secondary water with regulating the voltage regulator and pressure. The variation of pressure used is 0.2 bar up to 1 bar with a rise of 0.2 bar. Then receive height difference  $\Delta l$  of the red water that each inclined manometer syngas and air.*

*From this research, the burner that has the highest temperature of 478 ° C with air ratio  $\dot{m}_{\text{primary}} = 0.015 \text{ kg / s}$  and  $\dot{m}_{\text{secondary}} = 0.06 \text{ kg / s}$  is at a pressure of 1 bar, the burner power is highest at the position with syngas pressure of 1 bar at air ratio  $\dot{m}_{\text{primary}} = 0.015 \text{ kg / s}$  and  $\dot{m}_{\text{secondary}} = 0.07 \text{ kg / s}$  of 141,6452kW., SFC is highest at the position of  $\dot{m}_{\text{primary}}$  air ratio = 0.025 kg / s and  $\dot{m}_{\text{secondary}} = 0.05 \text{ kg / s}$ , and a pressure of 1 bar is equal to 1.0592 kg/ (kWh), and burner efficiency is highest at the position  $\dot{m}_{\text{primary}}$  air ratio = 0.015 kg / s and  $\dot{m}_{\text{secondary}} = 0.06 \text{ kg / s}$  and a pressure of 0.2 bar, which is 0.3930 or 39.30% and then a variation to the performance type partially premixed gas burner is best to air ratio  $\dot{m}_{\text{primary}} = 0.015 \text{ kg / s}$  and  $\dot{m}_{\text{secondary}} = 0.07 \text{ kg / s}$  and the visualization of the best fire on the position of the air ratio  $\dot{m}_{\text{primary}} = 0.015 \text{ kg / s}$  and  $\dot{m}_{\text{secondary}} = 0.06 \text{ kg / s}$ .*

**Keywords:** *burners, biomass, primary and secondary air, sawdust, syngas, partially premixed.*

## KATA PENGANTAR

Rasa syukur, hormat dan pujian penulis sampaikan kepada Allah SWT yang telah memberikan hidup, teguran, harapan, semangat dan kekuatan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan judul:

### **KARAKTERISASI UNJUK KERJA *BURNER GAS TYPE PARTIALLY PREMIXED* BERBAHAN BAKAR *SYNGAS BIOMASSA SERBUK KAYU* DENGAN VARIASI *PRIMARY* DAN *SECONDARY AIR***

Keberhasilan tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak. Dengan ini saya mengucapkan terima kasih atas bantuan, petunjuk, arahan, dan bimbingan kepada yang terhormat:

1. Ayah Moch. Syahroji, Ibu Endang Iriani, dan Adikku, Roni Noor Adam yang selalu memahami, memberikan dukungan moral maupun matriil, dan doa yang tulus. Semoga penulis bisa membanggakan keluarga dan menjadi orang yang bermanfaat bagi keluarga dan lingkungan.
2. Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT., sebagai dosen pembimbing atas segala bimbingan dan bantuannya hingga penulis bisa menyelesaikan tugas akhir dengan baik.
3. Bapak Ir. Bambang Pramujati, Msc.Eng, PhD selaku Ketua Jurusan S1 Teknik Mesin FTI-ITS
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Sutardi, M.Eng., sebagai dosen wali.
5. Bapak Ary Bachtiar K. P., ST. MT., Bambang Arip Dwiyantoro, ST., M.Eng, PhD., dan Dr. Wawan Aries Widodo sebagai pembahas dan penguji mulai saat seminar sampai ujian sidang Tugas Akhir saya.
6. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmu yang tak ternilai dan karyawan yang memberikan banyak kemudahan dan kerjasama selama ini.



7. Teman seperjuangan dalam Tugas Akhir ini Irvan Hedapratama, Falah, Wisnu, Dicky, Rasyid, Ahmed, Firman, Pasca, Niam, Galih dan Mirza.
8. Teman-teman di Lab. Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar, ITS yang telah banyak membantu selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
9. Teman-teman Lintas Jalur S1 Teknik Mesin 2013 semester ganjil, edwin, juli, filipi, alif, ina, surya, joko, dian, ayu, robin, edo, septi, eza, hayu, dan lainnya yang tidak dapat disebutkan semua.

Saya mengucapkan terima kasih atas segala bantuan, bimbingan, dan fasilitas yang telah diberikan kepada saya hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini. Saya menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu saya mengharapkan saran dan kritik untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga tugas akhir ini bisa memberikan manfaat bagi masyarakat luas.

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan Laporan.....	5
<b>BAB II DASAR TEORI</b>	
2.1 Biomassa.....	7
2.1.1 Karakteristik Serbuk Kayu .....	8
2.1.2 Gasifikasi Biomassa .....	9
2.2 Burner .....	11
2.3 Bahan Bakar .....	12
2.3.1 Jenis-jenis bahan bakar.....	13
2.4 Teori Pembakaran.....	13

2.4.1	Perhitungan stoikiometri kebutuhan udara .....	14
2.4.2	Pembakaran non-stoikiometri.....	15
2.4.3	<i>Primary air</i> dan <i>secondary air</i> .....	16
2.4.4	Pembakaran aktual.....	18
2.4.5	Api.....	19
2.4.6	Klasifikasi api.....	21
2.4.7	Udara Pembakaran.....	23
2.4	Indikator Performance Burner .....	25
2.4.1	Distribusi temperatur .....	25
2.4.2	Daya burner.....	26
2.4.3	Konsumsi bahan bakar spesifik (SFC).....	27
2.4.4	Efisiensi <i>burner</i> .....	27
2.5	Campuran Udara - Bahan Bakar .....	28
2.5.1	Rasio Udara-Bahan Bakar (Air-fuel Ratio/AFR) .....	28
2.5.2	Rasio Ekuivalensi .....	29
2.5.3	Udara Berlebih (Excess Air).....	30
2.6	Peneliti Terdahulu.....	30
2.6.1	Penelitian Oleh Mahatma Pandima .....	30
2.6.2	Peneliti oleh Surjosatyo .....	32
2.6.3	Peneliti Oleh Yong Liu.....	33
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>		
3.1	Tahapan Pengerjaan Tugas Akhir .....	37
3.2	Penjelasan Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir .....	38
3.2.1	Tinjauan Pustaka .....	38
3.2.2	Pengamatan Instalasi .....	38

3.2.3	Perancangan Peralatan Penelitian.....	38
3.3	Perencanaan dan perencanaan eksperimen.....	45
3.3.1	Parameter Percobaan.....	45
3.3.2	Langkah Persiapan Alat.....	47
3.3.3	Langkah Pengujian.....	48
3.3.4	Langkah pengambilan data.....	48
3.4	Flowchart Percobaan .....	50
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Data hasil penelitian .....	51
4.1.1	Properties Bahan Bakar .....	51
4.1.2	Analisa Reaksi Pembakaran .....	51
4.1.3	Low Heating Value (LHV) syngas.....	54
4.2	Perhitungan Data .....	55
4.2.1	Perhitungan <i>Air Fuel Ratio</i> (AFR) .....	56
4.2.2	Perhitungan entalpi pembakaran .....	56
4.2.3	Perhitungan Energi Pembakaran.....	60
4.2.4	Perhitungan daya burner .....	60
4.2.5	Efisiensi Burner .....	60
4.2.6	SFC burner.....	60
4.3	Analisa Grafik.....	61
4.3.1	Grafik fungsi temperatur dan tekanan 0.015 kg/s <i>primary</i> dan 0.04-0,06 kg/s <i>secondary</i> .....	61
4.3.2	Grafik fungsi tekanan dan daya <i>burner</i> 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	64
4.3.3	Grafik fungsi tekanan dan efisiensi <i>burner</i> 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	67

4.3.4 Grafik fungsi tekanan dan SFC <i>burner</i> 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	68
4.4 Visualisasi Nyala Api .....	69
4.4.1 Visualisasi Nyala Api 0,01 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	70
4.4.2 Visualisasi Nyala Api 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	73
4.4.3 Visualisasi Nyala Api 0,02 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	76
4.4.4 Visualisasi Nyala Api 0,025 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	79
4.4.5 Visualisasi Nyala Api 0,03 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	82

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan .....	85
5.2 Saran .....	86

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## **BIOGRAFI PENULIS**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenis Proses Biomassa.....	7
Gambar 2. 2 Jenis Gasifier.....	10
Gambar 2. 3 Premixed Burner .....	11
Gambar 2. 4 Diffusion mixed .....	11
Gambar 2. 5 Partially Premixed.....	12
Gambar 2. 6 Staged Burner.....	12
Gambar 2. 7 Aliran udara <i>primary air</i> dan <i>secondary air</i> pada <i>burner</i> .....	17
Gambar 2. 8 <i>Furnace</i> dengan natural draft (Lieberman) ....	18
Gambar 2. 9 Segitiga Api.....	20
Gambar 2. 10 Model pencampuran (a) Premix, (b) Difusi .	22
Gambar 2. 11 Laminar <i>Turbulent Flame</i> .....	23
Gambar 2. 12 Skema Reaksi Pembakaran .....	26
Gambar 2. 13 Distribusi temperatur pada tekanan gas 1,2 bar .....	31
Gambar 2. 14 Grafik Daya Burner.....	32
Gambar 2. 15 Skema pengujian burner gas .....	33
Gambar 3. 1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir.....	37
Gambar 3. 2 Skema Penelitian.....	39
Gambar 3. 3 <i>Burner</i> .....	39
Gambar 3. 4 Blower Sentrifugal .....	40
Gambar 3. 5 Pemantik Api.....	40
Gambar 3. 6 <i>Thermocouple Type K</i> .....	41
Gambar 3. 7 Pressure Gauge.....	41
Gambar 3. 8(a) Konfigurasi <i>pitot static tube</i> (b) <i>Inclined</i> <i>Manometer</i> $\Theta = 15^\circ$ .....	42
Gambar 3. 9 Voltage Regulator .....	45

Gambar 3. 10 Flowchart Percobaan .....	50
Gambar 3. 11 Flowchart Percobaan <i>Secondary</i> .....	50

Gambar 4. 1 Grafik temperatur dan tekanan 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,06 kg/s <i>secondary</i> .....	62
Gambar 4. 2 Grafik daya <i>burner</i> 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	66
Gambar 4. 3 Grafik efisiensi <i>burner</i> 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	67
Gambar 4. 4 Grafik SFC <i>burner</i> 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,04-0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	68
Gambar 4. 5 Pengukuran distribusi temperatur .....	69
Gambar 4. 6 Visualisasi nyala api pada (a) 0,01 kg/s <i>primary</i> dan 0,04 kg/s <i>secondary</i> (b) 0,01 kg/s <i>primary</i> dan 0,05 kg/s <i>secondary</i> (c) 0,01 kg/s <i>primary</i> dan 0,06 kg/s <i>secondary</i> (d) 0,01 kg/s <i>primary</i> dan 0,07 kg/s <i>secondary</i> (e) 0,01 kg/s <i>primary</i> dan 0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	72
Gambar 4. 7 Visualisasi nyala api pada (a) 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,04 kg/s <i>secondary</i> (b) 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,05 kg/s <i>secondary</i> (c) 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,06 kg/s <i>secondary</i> (d) 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,07 kg/s <i>secondary</i> (e) 0,015 kg/s <i>primary</i> dan 0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	75
Gambar 4. 8 Visualisasi nyala api pada (a) 0,02 kg/s <i>primary</i> dan 0,04 kg/s <i>secondary</i> (b) 0,02 kg/s <i>primary</i> dan 0,05 kg/s <i>secondary</i> (c) 0,02 kg/s <i>primary</i> dan 0,06 kg/s <i>secondary</i> (d) 0,02 kg/s <i>primary</i> dan 0,07 kg/s <i>secondary</i> (e) 0,02 kg/s <i>primary</i> dan 0,08 kg/s <i>secondary</i> .....	78
Gambar 4. 9 Visualisasi nyala api pada (a) 0,025 kg/s <i>primary</i> dan 0,04 kg/s <i>secondary</i> (b) 0,025 kg/s <i>primary</i> dan 0,05 kg/s <i>secondary</i> (c) 0,025 kg/s <i>primary</i> dan 0,06 kg/s <i>secondary</i> (d) 0,025 kg/s <i>primary</i> dan 0,07 kg/s <i>secondary</i> (e) 0,025 kg/s <i>primary</i> dan 0,08 <i>secondary</i> .....	81

Gambar 4. 10 Visualisasi nyala api pada (a) 0,03 kg/s *primary* dan 0,04 kg/s *secondary* (b) 0,03 kg/s *primary* dan 0,05 kg/s *secondary* (c) 0,03 kg/s *primary* dan 0,06 kg/s *secondary* (d) 0,03 kg/s *primary* dan 0,07 kg/s *secondary* (e) 0,03 kg/s *primary* dan 0,08 kg/s *secondary* .....84



## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Komposisi syngas serbuk kayu .....	10
Tabel 2. 2 Tabel komposisi Udara di Atmosfer .....	24
Tabel 2. 3 Perbandingan hasil eskperimental.....	33
Tabel 2. 4 <i>Experimental Parameters Associated With Each Primary Air Ratio</i> .....	34
Tabel 2. 5 <i>Experimental Parameters Associated With Each Inner Secondary Air Ratio</i> .....	34
Tabel 3. 1 Perencanaan percobaan .....	46
Tabel 3. 2 Rancangan Eksperimen.....	46
Tabel 3. 3 <i>Mapping</i> Rancangan Eksperimen .....	47
Tabel 4. 1 Besarnya komposisi kandungan <i>syngas</i> serbuk kayu.....	51
Tabel 4. 2 <i>Molecular Weight</i> pada masing-masing komposisi <i>syngas</i> serbuk kayu .....	52
Tabel 4. 3 <i>Low Heating Value</i> (LHV) [17].....	55
Tabel 4. 4 Koefisien reaktan kandungan gas .....	59

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Dalam kehidupan sehari-hari, aktivitas manusia tidak pernah lepas dari kemajuan teknologi dan kebutuhan energi. Dengan banyaknya permintaan akan kebutuhan energi, maka menimbulkan masalah yaitu jumlah energi yang semakin terbatas. Oleh karena itu, krisis energi saat ini menuntut manusia agar dapat menghasilkan energi alternatif dari berbagai sumber. Salah satu cara untuk menghasilkan energi alternatif adalah dengan cara memanfaatkan limbah serbuk kayu.

Data dari Departemen Kehutanan dan Perkebunan untuk tahun 1999/2000 menunjukkan bahwa produksi kayu lapis Indonesia mencapai 4,61 juta m<sup>3</sup>, sedangkan kayu gergajian mencapai 2,6 juta m<sup>3</sup> per tahun. Dengan asumsi bahwa jumlah limbah kayu yang dihasilkan mencapai 61%, maka diperkirakan limbah kayu yang dihasilkan mencapai lebih dari 4 juta m<sup>3</sup>. Dari data tersebut diatas menunjukkan bahwa potensi limbah kayu cukup besar dan ternyata hanya merupakan bagian prosentase kecil saja kayu yang dieksploitasi dapat digunakan secara maksimal dan selebihnya berupa limbah kayu. Melihat masih besarnya limbah yang dihasilkan dari industri penggergajian kayu tersebut setiap tahunnya dan apabila dibiarkan begitu saja tanpa ada pemanfaatan secara efisien, dikhawatirkan limbah kayu tersebut dapat mencemari lingkungan sekitarnya [1].

Limbah serbuk gergaji yang dihasilkan dari industri penggergajian masih dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, diantaranya sebagai media tanam, bahan baku *furniture* dan bahan baku briket arang. Salah satu usaha meningkatkan nilai tambah dari serbuk gergajian ini adalah dibuat karbon aktif[2].

Proses gasifikasi telah dikenal sejak abad lalu untuk mengolah batu bara, gambut atau serbuk kayu yang menjadi bahan bakar gas yang kini mulai dimanfaatkan. Secara sederhana proses gasifikasi dapat dikatakan sebagai reaksi kimia pada temperatur tinggi antara biomassa dan udara[3].

Proses pembuatan arang aktif dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu pengaktifan secara fisika dan secara kimia. Pengaktifan secara fisika pada dasarnya dilakukan dengan cara memanaskan bahan baku pada suhu yang cukup tinggi (600 – 1000 C) pada kondisi miskin udara (oksigen), kemudian pada suhu tinggi tersebut dialirkan media pengaktif seperti uap air dan CO<sub>2</sub>. Sedangkan pada pengaktifan kimiawi, bahan baku sebelum dipanaskan dicampur dengan bahan kimia tertentu seperti KOH, NaOH, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan lain sebagainya. Biasanya pengaktifan secara kimiawi tidak membutuhkan suhu tinggi seperti pada pengaktifan secara fisis, namun diperlukan tahap pencucian setelah diaktifkan untuk membuang sisa – sisa bahan kimia yang dipakai[4].

Untuk industri besar dan terpadu, limbah serbuk kayu gergajian sudah dimanfaatkan menjadi bentuk briket arang dan arang aktif yang dijual secara komersial. Namun untuk industri penggergajian kayu skala industri kecil yang jumlahnya mencapai ribuan unit dan tersebar di pedesaan, limbah ini belum dimanfaatkan secara optimal[5].

Ada empat macam tipe *burner* diantaranya adalah *premixed burner* adalah pencampuran antara oksidator dan bahan bakar pada *burner* tipe ini dilakukan sebelum dipantik, *diffusion-mixed* adalah kebalikan dari *premixed* yaitu tidak dilakukan pencampuran terlebih dahulu sebelum campuran dipantik, *partially premixed* merupakan gabungan antara *premixed* dan *diffusion-mixed burner* dan *staged burner* memiliki banyak tingkat/tahap pencampuran antara udara dan bahan bakar[6].

Pengaruh unjuk kerja burner terhadap variasi *primary air* dan *secondary air* melalui pengaturan jumlah suplai udara

yang dimasukkan pada *burner*. *Setting burner* yang benar dan ditambah dengan pencampuran udara dan bahan bakar yang baik akan menghasilkan suhu nyala api yang maksimal serta bentuk nyala yang baik (padat dan mengerucut). Udara sekunder yang terlalu banyak ataupun terlalu sedikit akan menghasilkan pembakaran yang buruk. Sejumlah kecil udara *excess* diperlukan untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna, sebaliknya terlalu banyaknya udara *excess* akan menurunkan suhu nyala api dan efisiensi *furnace*[7].

Pada proposal tugas akhir ini akan membahas tentang karakterisasi unjuk kerja *burner type partially premixed* berbahan bakar *syngas* biomassa serbuk kayu dengan variasi *primary & secondary air*. Pengaruh perbandingan jumlah udara terhadap burner adalah jika rasio perbandingan udara *primary air* dan *secondary air* sudah tepat maka kualitas pembakaran dan api lebih optimum dan daya yang dihasilkan lebih tinggi serta emisi yang dihasilkan rendah. Dengan dilakukannya penelitian ini dapat diharapkan dapat menghasilkan rancangan *burner* yang memiliki perbandingan *primary and secondary air* yang tepat sehingga mendapatkan distribusi temperatur api sebesar antara 600 - 1000 °C, serta diperoleh daya burner, efisiensi, air fuel ratio (AFR) dan konsumsi bahan bakar spesifik.

## 1.2 Perumusan Masalah

Unjuk kerja burner gas dipengaruhi oleh kesesuaian antara konsumsi bahan bakar gas, *primary* dan *secondary air*, sehingga permasalahan dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana mendapatkan optimasi unjuk kerja dengan pencampuran bahan bakar dan udara melalui variasi komposisi *primary* dan *secondary air* untuk *type burner partially premixed*.
2. Bagaimana mendapatkan visualisasi api pada *burner type partially premixed*.

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diambil pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Gas *burner* yang digunakan merupakan tipe *partially premixed* dengan penambahan *secondary air* melalui *swirl*.
2. Bahan bakar yang digunakan adalah *syngas* hasil reaktor biomassa dari serbuk kayu.
3. Kondisi suhu dan kelembaban udara dianggap tetap, dilakukan pada ruangan yang dikondisikan.
4. Kondisi instalasi dianggap tidak ada kebocoran.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

1. Untuk mendapatkan optimasi unjuk kerja dengan pencampuran bahan bakar dan udara melalui variasi komposisi *primary* dan *secondary air* untuk *type burner partially premixed*.
2. Untuk mendapatkan visualisasi nyala api pada *burner type partially premixed*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini memiliki manfaat antara lain sebagai berikut:

1. Dapat menghasilkan *burner* gas bahan bakar *syngas* dengan performa yang baik dan menghasilkan temperatur tinggi sehingga pemanfaatan *syngas* bisa bermanfaat untuk kebutuhan industri dan masyarakat secara umum.
2. Menambah pengetahuan seputar *burner* gas khususnya pada *type partially premixed*.

## 1.6 Sistematika Penulisan Laporan

Sistematika penulisan terdiri dari 3 bab yang masing-masing bab berisi sebagai berikut:

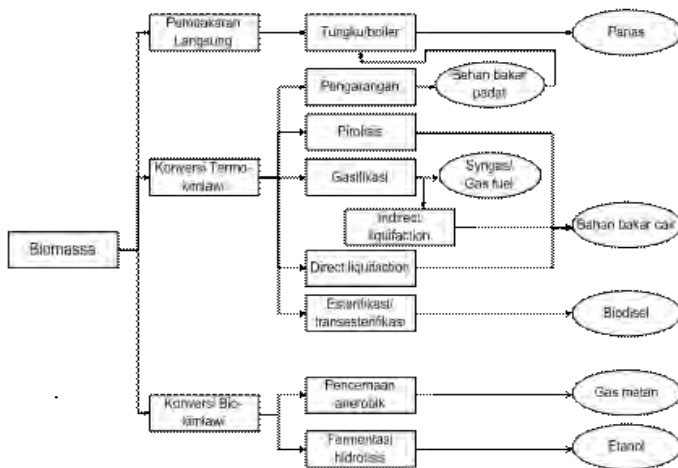
1. Bab 1 Pendahuluan, bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat tugas akhir dan sistematika penulisan laporan.
2. Bab 2 Dasar Teori, bab ini berisi dasar-dasar ilmu yang mendukung pengerjaan tugas akhir.
3. Bab 3 Metodologi Penelitian, bab ini berisi tahapan-tahapan penelitian tentang *burner type partially premixed* serta langkah-langkah pengambilan data pada saat percobaan.
4. Bab 4 Analisa dan Pembahasan, bab ini berisi tentang analisa perhitungan yang diperlukan dalam penelitian, pembahasan grafik serta pembahasan visualisasi nyala api.
5. Bab 5 Kesimpulan dan Saran, pada bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari penelitian yang telah dilakukan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB II DASAR TEORI

### 1.1 Biomassa

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang mengacu pada bahan biologis yang berasal dari organisme yang belum lama mati (dibandingkan dengan bahan bakar fosil). Sumber-sumber biomassa yang paling umum adalah bahan bakar kayu, limbah dan alkohol. Biomassa merupakan sumber energi terbarukan karena tanaman dapat kembali tumbuh pada lahan yang sama. Kayu saat ini merupakan sumber yang paling banyak digunakan untuk biomassa. Di amerika serikat, misalnya hampir berasal dari kayu sebagai bahan bakar.



Gambar 2. 1 Jenis Proses Biomassa

Ada tiga jenis proses yang digunakan untuk mengkonversi biomassa menjadi bentuk energi yang berguna, yaitu: pembakaran langsung, konversi termokimiawi dan konversi biokimiawi. Pembakaran langsung merupakan teknologi yang paling sederhana karena pada umumnya biomassa telah dapat langsung dibakar.



Beberapa biomassa perlu dikeringkan terlebih dahulu dan didensifikasi untuk kepraktisan dalam penggunaan. Konversi termokimiawi merupakan teknologi yang memerlukan tenaga termal untuk memicu terjadinya reaksi kimia dalam bahan bakar. Sedangkan konversi biokimiawi merupakan teknologi konversi yang menggunakan bantuan mikroba dalam menghasilkan bahan bakar.

### **1.1.1 Karakteristik Serbuk Kayu**

Serbuk gergaji kayu terbentuk dari zat – zat organik seperti selulosa, hemiselulosa, lignin, pentosan, silika dan lain – lain. Sedangkan unsur pembentuknya sebagian besar terdiri dari Karbon ( C ), Hydrogen ( H ), Nitrogen ( N ), Oksigen ( O<sub>2</sub> ), abu serta unsur - unsur lainnya. Pemanasan kayu hingga suhu sedikit diatas 100°C sudah menyebabkan peruraian thermal. Sekitar 270°C 10 peruraian thermal ini tidak membutuhkan sumber panas eksternal lagi karena proses menjadi eksotermis. Kayu terurai secara bertahap, hemiselulosa terdegradasi pada kisaran suhu 200 – 260°C, selulosa pada suhu 240 – 350°C, dan lignin pada 280 – 500°C[8]. Kondisi – kondisi yang berpengaruh terhadap proses ini adalah :

1. Suhu pemasakan yang tinggi lebih dari 180°C akan menyebabkan degradasi selulosa atau dapat mempersingkat waktu pemasakan. Sedangkan bila suhu pemasakan kurang dari 170°C kualitas yang akan dihasilkan dan rendemen akan menjadi turun untuk bahan baku tertentu. Untuk suhu pemasakan 170°C, Sodium Hydroxide (NaOH) melarutkan lignin sebanyak 87 %[9].
2. Waktu pemasakan pada pembuatan pulp batang rami dengan proses soda anthraquinon diperoleh hasil yang optimum pada 3,5 jam dan 4 jam[9].
3. Penambahan Bahan Kimia Pembuatan lignin dengan proses soda memiliki kelemahan, yaitu rendahnya selektifitas delignifikasi yang memungkinkan terjadinya degradasi

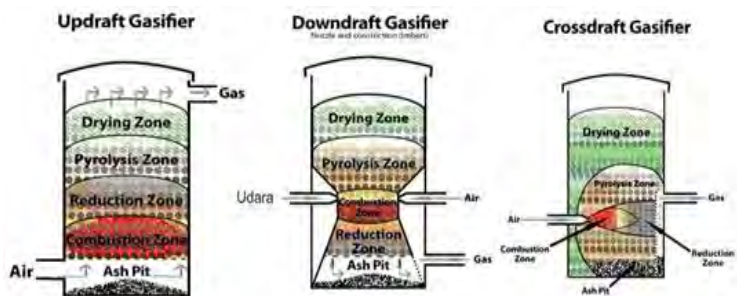
komponen karbohidrat secara berlebihan, sehingga dapat menurunkan sifat – sifat dan rendemen lignin.

### 1.1.2 Gasifikasi Biomassa

Secara sederhana, gasifikasi biomassa dapat didefinisikan sebagai proses untuk mengkonversi bahan baku biomassa padat menjadi bahan bakar gas atau bahan baku gas kimia (*syngas*). Untuk mengkonversi biomassa padat menjadi gas yang mudah terbakar, diperlukan bahan untuk mendorong reaksi kimia tersebut. Bahan ini utamanya adalah udara ( $N_2$ ,  $O_2$ ), oksigen ( $O_2$ ),  $H_2O$ , atau  $CO_2$  diaplikasikan pada campuran. Udara (hanya  $O_2$  yang bereaksi) dan  $O_2$  membangkitkan panas melalui oksidasi dan peningkatan  $O_2$  efektif menurunkan jumlah gas yang mudah terbakar.

Proses gasifikasi dapat dilihat sebagai konversi sebagai pembakaran, tetapi dengan komposisi oksigen yang jauh lebih sedikit dibandingkan pembakaran. Rasio oksigen yang tersedia dan jumlah oksigen yang dipakai untuk pembakaran penuh disebut sebagai *equivalence ratio*. Untuk *equivalence ratios* dibawah 0,1, proses tersebut dinamakan proses *pyrolysis* dan hanya fraksi sederhana dari energi biomassa yang terdapat pada produk gas. Sisanya menjadi arang dan *oily residues*. Apabila *equivalence ratio* berada diantara 0,2 dan 0,4 proses ini dinamakan gasifikasi yang tepat.

Proses gasifikasi untuk mendapatkan gas dari biomassa dinamakan gasifier. Ada beberapa contoh jenis gasifier antara lain: *uppdraft gasifier*, *downdraft gasifier* dan *fluidized bed gasifier*. Jenis gasifikasi ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 2 Jenis Gasifier

Berikut data-data komposisi gas syngas serbuk kayu berdasarkan pengujian LPPM – ITS:

Tabel 2. 1 Komposisi syngas serbuk kayu

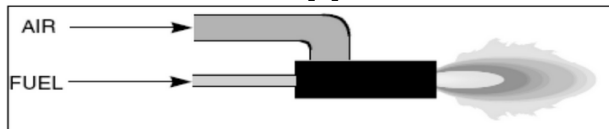
Komposisi	Persentase (% massa)
CH <sub>4</sub>	1,81
CO <sub>2</sub>	11,23
N <sub>2</sub>	49,26
O <sub>2</sub>	12,79
H <sub>2</sub>	5,34
CO	19,57

## 1.2 Burner

Pembakar (*burner*) adalah alat yang digunakan untuk mereaksikan secara baik antara bahan bakar dengan oksidator sehingga dapat terjadi proses pembakaran. Pembakar (*burner*) merupakan komponen yang paling penting dalam industri, karena tanpa burner yang baik, akan terjadi pemborosan dari bahan bakar yang akan dipakai. Burner menurut tipe pencampurannya dapat dibagi menjadi :

### 1. *Premixed burner*

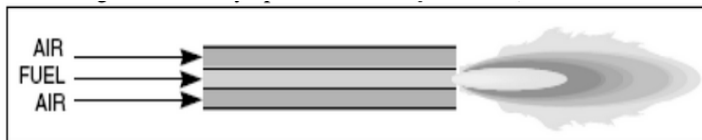
Pencampuran antara oksidator dan bahan bakar pada *burner* tipe ini dilakukan sebelum dipantik. Hasil dari burner tipe ini adalah api yang lebih pendek dan intens jika di bandingkan dengan pembakaran secara difusi. Temperatur hasil pembakaran dengan *premixed burner* ini lebih tinggi di bandingkan dengan difusi. Kerugian *burner* tipe ini adalah besarnya kadar emisi gas buang Nox. Oksidator yang biasa di pakai burner ini adalah udara[6].



Gambar 2. 3 Premixed Burner

### 2. *Diffusion-mixed burner*

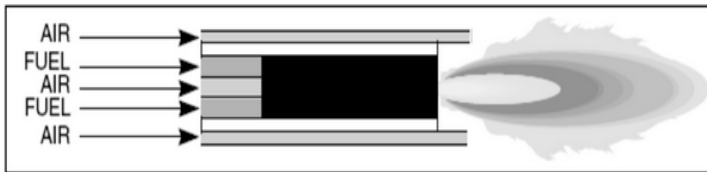
Pada burner tipe ini, tidak dilakukan pencampuran terlebih dahulu sebelum campuran dipantik. Keuntungan dari burner ini adalah api yang lebih panjang dan temperatur api yang lebih seragam. Jika oksidator yang di gunakan adalah oksigen murni, biasanya menggunakan burner tipe ini untuk menghindari adanya percikan balik (*flashback*)[6].



Gambar 2. 4 Diffusion mixed

### 3. *Partially premixed burner*

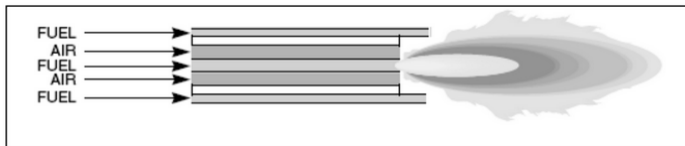
merupakan gabungan antara *premixed* dan *diffusion-mixed* burner. Pada awal / bagian depan *burner*, ada sebagian oksidator dan bahan bakar yang telah dicampur terlebih dahulu sedangkan pada ujung *burner* (ketika akan dipantik) ada saluran untuk suplai oksidator dan bahan bakar[6].



Gambar 2. 5 Partially Premixed

### 4. *Staged burner*

Burner ini memiliki banyak tingkat/tahap pencampuran antara udara dan bahan bakar. Burner ini bertujuan untuk mengontrol perpindahan panas, membuat api menjadi lebih panjang, dan mengurangi emisi gas buang seperti Nox. Jenis pembakaran ini memiliki kelemahan, yaitu bisa terjadinya interaksi antara masing-masing tahap sehingga pembakaran akan makin tidak stabil dan susah di prediksi[6].



Gambar 2. 6 Staged Burner

## 1.3 Bahan Bakar

Bahan bakar adalah suatu materi apapun yang bisa diubah menjadi energi. Biasanya bahan bakar mengandung energi panas dan dapat dilepaskan dan dimanipulasi. Kebanyakan bahan bakar digunakan manusia melalui proses pembakaran (reaksi redoks)

dimana bahan bakar tersebut akan melepaskan panas setelah direaksikan dengan oksigen di udara. Proses lain untuk melepaskan energi dari bahan bakar adalah melalui reaksi eksotermal dan reaksi nuklir (seperti fisi nuklir atau fusi nuklir)[10].

### **1.3.1 Jenis-jenis bahan bakar**

Berdasarkan bentuk dan wujudnya adalah sebagai berikut:

#### **1. Bahan bakar padat**

Bahan bakar padat merupakan bahan bakar yang berbentuk padat dan kebanyakan menjadi sumber energi panas. Misalnya kayu dan batubara. Energi panas yang dihasilkan bisa digunakan untuk memanaskan air menjadi uap untuk menggerakkan peralatan dan menyediakan energi.

#### **2. Bahan bakar cair**

Bahan bakar cair adalah bahan bakar yang strukturnya tidak rapat. Jika dibandingkan dengan bahan bakar padat molekulnya dapat bergerak bebas. Bensin/gasolin/premium, minyak solar, minyak tanah adalah contoh bahan bakar cair.

#### **3. Bahan bakar gas**

Bahan bakar gas ada dua jenis, yakni Compressed Natural Gas (CNG) dan Liquid Petroleum Gas (LPG). CNG pada dasarnya terdiri dari metana sedangkan LPG adalah campuran dari propana, butana dan bahan kimia lainnya. LPG yang digunakan untuk kompor rumah tangga, sama bahannya dengan bahan bakar gas yang biasa digunakan untuk sebagian kendaraan bermotor.

## **1.4 Teori Pembakaran**

Pembakaran adalah serangkaian reaksi-reaksi kimia eksotermal antara bahan bakar dan oksidan berupa udara yang

disertai dengan produksi energi berupa panas dan konversi senyawa kimia. Pelepasan panas dapat mengakibatkan timbulnya cahaya dalam bentuk api. Bahan bakar yang umum digunakan adalah senyawa organik, khususnya hidrokarbon dalam fasa gas, cair atau padat.

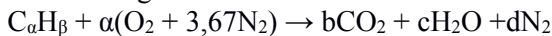
Secara umum, pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses atau reaksi oksidasi yang sangat cepat antara bahan bakar (*fuel*) dan oksidator dengan menimbulkan panas. Bahan bakar (*fuel*) merupakan segala substansi yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N) dan sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala substansi yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar (*fuel*).

Pada umumnya pembakaran tidak menggunakan oksigen murni melainkan memanfaatkan oksigen yang ada di udara. Jumlah udara minimum yang diperlukan untuk menghasilkan pembakaran lengkap disebut sebagai jumlah udara teoritis (atau stoikiometrik). Akan tetapi pada kenyataannya untuk pembakaran lengkap udara yang dibutuhkan melebihi jumlah udara teoritis. Kelebihan udara dari jumlah udara teoritis disebut sebagai *excess air* yang umumnya dinyatakan dalam persen. Parameter yang sering digunakan untuk mengkuantifikasi jumlah udara dan bahan bakar pada proses pembakaran tertentu adalah rasio udara-bahan bakar. Apabila pembakaran lengkap terjadi ketika jumlah udara sama dengan jumlah udara teoritis maka pembakaran disebut sebagai pembakaran sempurna[11].

#### **1.4.1 Perhitungan stoikiometri kebutuhan udara**

Jika ketersediaan oksigen untuk reaksi oksidasi mencukupi, maka bahan bakar hidrokarbon akan dioksidasi secara menyeluruh, yaitu karbon dioksidasi menjadi karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan hidrogen dioksidasi menjadi uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Pembakaran yang demikian disebut sebagai pembakaran stoikiometri dan selengkapnya persamaan reaksi kimia untuk pembakaran

stoikiometri dari suatu bahan bakar hidrokarbon ( $C_\alpha H_\beta$ ) dengan udara dituliskan sebagai berikut :



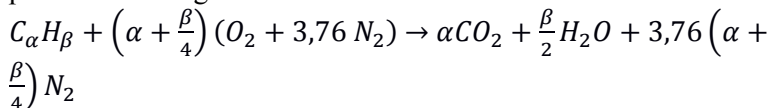
Kesetimbangan C :  $\alpha = b$

Kesetimbangan H :  $\beta = 2c \rightarrow c = \beta/2$

Kesetimbangan O :  $2a = 2b + c \rightarrow a = b + c/2 \rightarrow a = \alpha + \beta/4$

Kesetimbangan N :  $2(3,76)a = 2d \rightarrow d = 3,76a \rightarrow d = 3,76(\alpha + \beta/4)$

Substitusi persamaan-persamaan kesetimbangan di atas ke dalam persamaan reaksi pembakaran  $C_\alpha H_\beta$  menghasilkan persamaan sebagai berikut :



Jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mendapatkan pembakaran stoikiometri adalah :

$$m_{O_2} = \frac{m_{atom O_2}}{m_{mol C_\alpha H_\beta}} \times \text{persentase } C_\alpha H_\beta \left( \frac{kg}{kg \text{ bahan bakar}} \right) \quad (2.1)$$

Stoikiometri massa yang didasarkan pada rasio udara dan bahan bakar (*air fuel ratio*) untuk bahan bakar hidrokarbon ( $C_\alpha H_\beta$ ) adalah sebagai berikut :

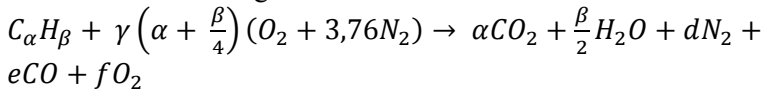
$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(\sum n_i \bar{M}_i)_{air}}{(\sum n_i \bar{M}_i)_{fuel}} = \frac{\left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right) \bar{M}_{O_2} + 3,76 \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right) \bar{M}_{N_2}}{\alpha \bar{M}_C + \beta \bar{M}_H} \quad (2.2)$$

#### 1.4.2 Pembakaran non-stoikiometri

Dalam aplikasinya, mekanisme pembakaran dituntut dapat berlangsung secara cepat sehingga sistem-sistem pembakaran dirancang dengan kondisi udara berlebih. Hal ini dimaksudkan untuk mengantisipasi kekurangan udara akibat tidak sempurnanya proses pencampuran antara udara dan bahan bakar. Pembakaran yang demikian disebut sebagai pembakaran non stoikiometri dan selengkapanya persamaan reaksi kimia untuk pembakaran non



stoikiometri dari suatu bahan bakar hidrokarbon ( $C_\alpha H_\beta$ ) dengan udara dituliskan sebagai berikut :

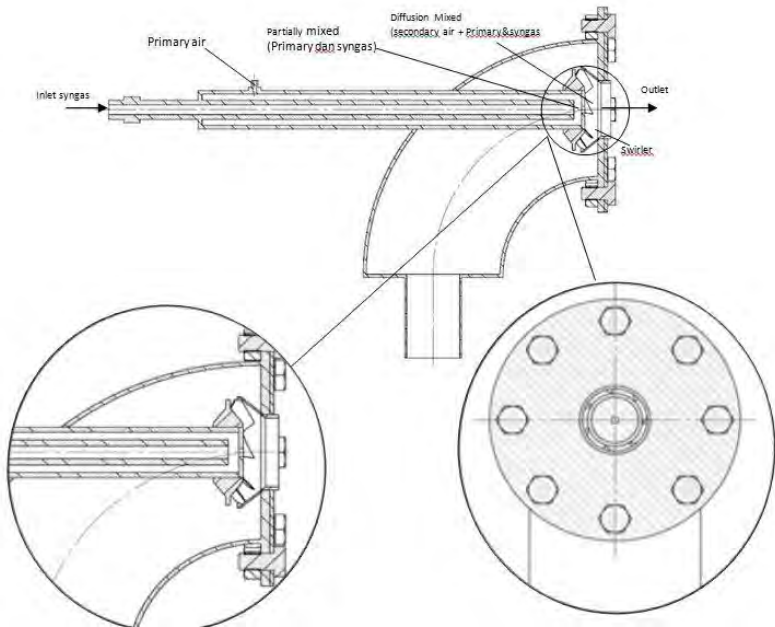


- Pembakaran dengan komposisi campuran stoikiometri. Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang maksimum dengan kehilangan panas yang minimum. Hasil pembakaran berupa  $CO_2$ , uap air, dan  $N_2$ .
- Pembakaran dengan komposisi campuran miskin. Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang maksimum tetapi diikuti dengan bertambahnya kehilangan panas karena udara berlebih. Hasil pembakaran berupa  $CO_2$ , uap air,  $O_2$  dan  $N_2$ .
- Pembakaran dengan komposisi campuran kaya Pada proses ini terjadi perpindahan panas yang kurang maksimum karena ada bahan bakar yang belum terbakar. Hasil pembakaran berupa HC, CO,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , dan  $N_2$ . Sedangkan fraksi karbon terbentuk dari reaksi sekunder antara CO dan  $H_2O$ .

#### 1.4.3 *Primary air dan secondary air*

Untuk mensuplai udara yang digunakan pada proses pembakaran, burner membutuhkan kerja beberapa kerja dari beberapa jenis. *Primary air* atau udara utama dapat diartikan sebagai udara utama yang memasuki *burner* sebagai pengantar bahan bakar *syngas* kedalam *burner*. *Primary air* pada *burner* berfungsi sebagai pensuplai udara utama pada *burner* untuk membantu proses pembakaran pada *burner*.

*Secondary air* adalah alat yang mendukung *primary air* untuk mensuplai udara pembakaran. Biasanya *secondary air* 50% dari jumlah udara total yang diumpankan, dan secara terpisah masuk kedalam *burner* yang disuplai melalui blower sentrifugal. Pengaturan *secondary air* dikontrol dengan menggunakan *voltage regulator*.

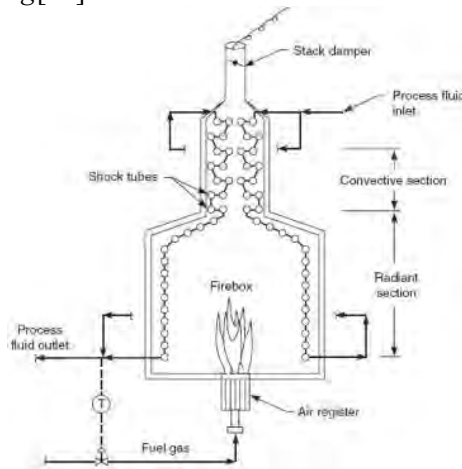


Gambar 2. 7 Aliran udara *primary air* dan *secondary air* pada *burner*

Gambar 2.8 menunjukkan salah satu jenis proses *furnace* dengan *natural draft*. Jika damper atau *air register* ditutup secara bertahap, maka suplai udara yang mengalir ke dalam *firebox* akan berkurang. Jika laju alir fluida proses dan laju alir bahan bakar (*fuel gas*) konstan, maka beberapa kemungkinan akan terjadi:

1. Suhu outlet furnace akan meningkat, sebagaimana penurunan udara *excess*. Hal ini disebabkan lebih banyak panas yang diberikan kepada fluida proses, dan panas yang dibuang melalui stack akan berkurang.
2. Suhu outlet furnace akan turun, sebagaimana penurunan laju alir udara pada saat melewati titik pembakaran absolut (*absolute combustion*). Pada kondisi ini akan diperoleh produk-produk pembakaran tidak sempurna atau pembakaran parsial,

seperti aldehid, keton, dan karbon monoksida yang dibuang melalui *stack*. Hal ini juga menyebabkan *heating value* bahan bakar akan turun dan memungkinkan terjadinya *afterburning*[14].



Gambar 2. 8 *Furnace* dengan natural draft (Lieberman)

Dengan demikian akan berbahaya jika *furnace* dioperasikan dengan jumlah udara yang tidak mencukupi, karena :

1. Produk hasil pembakaran tidak sempurna sangat panas, dan akan menyala dengan segera jika menemukan oksigen dalam jumlah yang cukup. Hal ini biasanya akan menyebabkan *afterburn* di bagian konveksi dan *stack* dan bahkan bisa menyebabkan ledakan.
2. Produk dari pembakaran parsial merupakan polutan yang menyebabkan polusi udara.

#### 2.4.4 Pembakaran aktual

Di dalam pembakaran sebenarnya tidak seluruh unsur dalam bahan bakar terbakar sempurna. Pembakaran tidak sempurna terjadi karena elemen-elemen dari bahan bakar tidak teroksidasi

secara sempurna. Sebagai contoh adalah pembakaran dari karbon (C), tidak seluruh unsur C akan terbakar membentuk CO<sub>2</sub> tetapi terbakar menjadi CO atau tetap masih dalam bentuk C. Adanya unsur C yang tidak terbakar ini menyebabkan kehilangan energi (*losses*), atau dengan kata lain efisiensi pembakaran tidak maksimal (pemborosan bahan bakar).

Dengan demikian maka terdapat kehilangan-kehilangan yang berupa kerugian panas yang seharusnya bisa dibebaskan dalam pembakaran karbon. Di samping itu, produksi karbon monoksida (CO) menimbulkan kontribusi terhadap pencemaran udara. Untuk mengurangi kerugian tersebut sampai pada tingkat yang minimal, maka perlu diberikan udara berlebih (*excess air*) pada sejumlah udara teoritis yang dipakai sehingga tersedia cukup oksigen untuk pembakaran. Dengan adanya udara berlebih maka jumlah udara sebenarnya (*actual air*) yang digunakan adalah :

$$m_{udara\ actual} = m_{udara\ stokiometri} + x\% (m_{udara\ stokiometri}) \quad (2.3)$$

dimana:

$m_{udara\ actual}$	: massa udara pembakaran aktual
$m_{udara\ stokiometri}$	: massa udara sesuai persamaan stoikiometri
$x\%$	: excess air

*Excess air* tidak lagi diperlukan apabila dimungkinkan udara dan bahan bakar dapat tercampur secara sempurna. Penting untuk diperhatikan bahwa penggunaan *excess air* yang tidak sesuai justru akan menurunkan efisiensi pembakaran. Karena udara yang tidak bereaksi (karena terlalu banyak), akan turut menyerap kalor pembakaran.

#### 2.4.5 Api

Api sering disebut sebagai zat keempat, karena tidak dapat dikategorikan ke dalam kelompok zat padat, zat cair maupun zat gas. Api disebut memiliki bentuk plasma. Plasma adalah bentuk gas yang mana sebagian dari partikel diionisasi. Seperti halnya gas,

plasma tidak memiliki bentuk yang tetap namun volume yang tetap, kecuali jika dikurung dalam suatu wadah yang tetap.

Segitiga api mengilustrasikan hubungan antara tiga elemen dasar yang diperlukan untuk membangkitkan api. Tiga elemen dasar yang dibutuhkan untuk membangkitkan api adalah senyawa oksigen, bahan bakar yang dapat terbakar dan mengandung energi, serta sumber api atau sumber panas. Jika salah satu dari ketiga elemen dasar tersebut telah habis, maka api akan padam, atau reaksi pembakaran tidak dapat dilanjutkan dengan baik. Ketiga elemen dasar yang dapat membangkitkan api tersebut digambarkan di dalam sebuah segitiga, yang sangat umum dikenal sebagai segitiga api. Berikut ini akan disajikan gambar segitiga api.



Gambar 2. 9 Segitiga Api

Sumber api atau sumber panas, pada awalnya disediakan atau didapatkan di luar sistem pembakaran, misalnya korek api, kilat ketika hujan, percikan listrik dan sumber – sumber api lainnya. Panas yang didapatkan dari luar sistem tersebut akan mulai memutuskan ikatan kimia di dalam bahan bakar, yang pada umumnya merupakan senyawa organik. Pemutusan awal ikatan kimia di dalam bahan bakar merupakan reaksi yang eksoterm atau menghasilkan energi panas. Energi panas yang dihasilkan dari pemutusan awal tersebut akan digunakan sebagai energi untuk pemanasan ikatan kimia berikutnya di dalam bahan bakar. Api menyala ketika panas yang dihasilkan dari pemutusan ikatan kimia di dalam bahan bakar dapat digunakan seterusnya untuk

memutuskan ikatan – ikatan kimia lain di dalam bahan bakar. Oleh karena itu, sumber panas hanya merupakan inisiator terbentuknya api. Setelah proses penyalaan api, sumber panas tidak lagi dibutuhkan, melainkan api dari reaksi pembakaran akan menghasilkan panas yang dapat digunakan oleh manusia untuk menunjang proses – proses yang akan dilakukan.

#### 2.4.6 Klasifikasi api

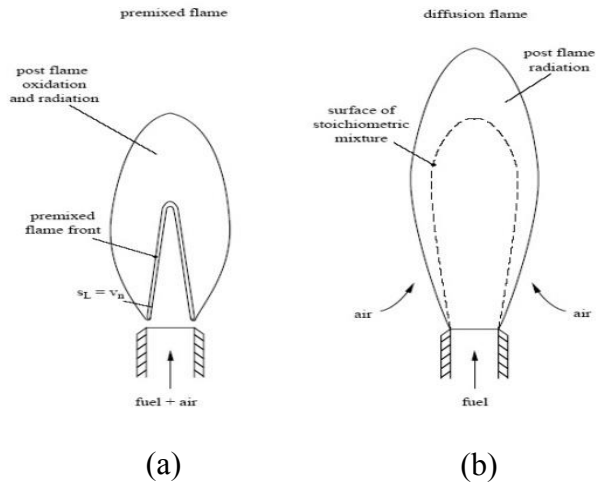
Menurut cara pencampuran dan reaksi (penyalaan) bahan bakar dan *oxidizer*, api dikategorikan menjadi :

##### 1. *Premixed Flame*

*Premixed flame* akan terjadi bila reaktan tercampur sempurna pada tingkat molekul sebelum terjadinya reaksi kimia yang signifikan. Laju pengembangan api (kecepatan pembakaran) tergantung dari komposisi kimia dan laju reaksi kimia. Pada beberapa kasus sering dijumpai bahwa *premixed flame* memberikan indikasi warna nyala api yang pada umumnya biru. Contoh sederhana tentang *premixed flame* sering dijumpai pada *bunsen burner*.

##### 2. *Diffusion Flame (Non-premixed)*

*Diffusion flame* akan terjadi bila pada keadaan awal bahan bakar dengan *oxidizer* terpisah dan reaksi terjadi hanya hubungan antara bahan bakar dan *oxidizer*. Waktu terjadinya pencampuran antara bahan bakar dengan udara umumnya terjadi secara bersamaan. Pengembangan *diffusion flame* tergantung pada kecepatan berdifusinya reaktan terhadap reaktan lainnya. Berikut contoh gambaran antara *diffusion flame* dan *premixed flame*.



Gambar 2. 10 Model pencampuran (a) Premix, (b) Difusi

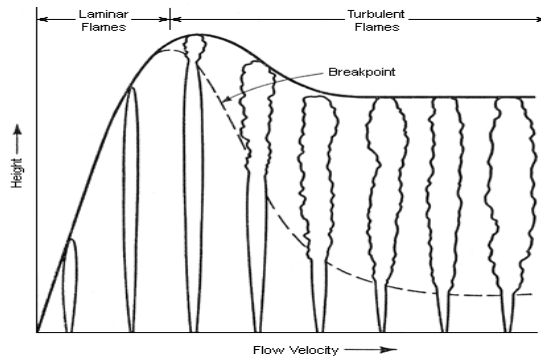
Selain berdasarkan hal diatas, nyala api juga dapat dikategorikan menurut sifat-sifat mekanika fluidanya, yaitu :

1. Api Laminer

Adalah kondisi dimana nyala api bersifat aliran laminer. Pada kondisi aliran ini, aliran dari gas terbakar mengikuti *streamline* aliran tanpa adanya diffusi turbulen di mana diffusi panas dan massa tergantung pada sifat molekul dari komponen gas.

2. Api Turbulen

Adalah kondisi dimana nyala api mempunyai sifat aliran turbulen. Pada kondisi turbulen ini, gas terbakar dengan pola aliran secara acak. Besarnya tingkat keacakan tergantung pada skala dan intensitas turbulensinya.



Gambar 2. 11 Laminar *Turbulent Flame*

Pada semua jenis pembakaran, campuran udara dan bahan bakar merupakan faktor penting yang harus diperhatikan dalam rangka mendapatkan proses pembakaran yang sempurna. Pada kompor minyak tanah dengan proses pembakaran yang sempurna, pembentukan api laminar akan ditandai dengan munculnya berwarna biru dan tanpa goyangan (stabil). Pada kompor dengan pembakaran sempurna dengan pembentukan api yang laminar, maka energi panas berupa temperatur tinggi yang dimiliki api akan disebarkan ke sekelilingnya dan akan membentuk dinding temperatur yang isothermal.

#### 2.4.7 Udara Pembakaran

Dalam proses pembakaran selalu diperlukan oksigen. Oksigen ini dapat diperoleh dari udara atmosfer. Beberapa definisi mengenai udara dapat dinyatakan sebagai berikut :

- Udara kering adalah udara tanpa kandungan air (*dry air*)
- Udara basah (*wet air*) adalah udara dengan kandungan air yang masih terikat
- Udara standard (*standard air*) adalah udara dengan kandungan 0,013 kg air per kg udara kering (sesuai dengan RH = 60% pada 25°C)

Komposisi udara dan data lain sebagai berikut :



Tabel 2. 2 Tabel komposisi Udara di Atmosfer

Unsur	% Volume	% Berat
Oksigen (O <sub>2</sub> )	20,99	23,15
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	78,03	76,85
Gas lain	0,98	

- Berat molekul ekivalen dari udara = 29
- Mole udara / mole oksigen = 100/10,99  
= 4,76
- Mole N<sub>2</sub> / mole oksigen = 78,04/20,99  
= 3,76
- Kg udara kering / kg O<sub>2</sub> = 100/23,15  
= 4,32
- Kg N<sub>2</sub> / kg O<sub>2</sub> = 76,85/23,15  
= 3,32

Jumlah minimum udara yang memberikan oksigen yang cukup untuk pembakaran tuntas terhadap semua karbon, hydrogen, dan sulfur yang terkandung didalam bahan bakar disebut jumlah udara teoritis. Untuk pembakaran tuntas dengan jumlah udara teoritis, produk yang dihasilkan terdiri dari karbondioksida, air, sulfur dioksida, nitrogen yang menyertai oksigen di dalam air, dan setiap nitrogen yang terkandung di dalam bahan bakar. Oksigen bebas tidak akan muncul sebagai salah satu produk pembakaran.

$$\overline{AF} = \left( \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} \right)$$

Jumlah udara yang disuplai biasanya lebih besar atau lebih kecil dari jumlah teoritis. Jumlah air *actual* yang disuplai biasanya dinyatakan dalam bentuk presentase udara teoritis. Sebagai contoh, udara teoritis 150% berarti udara actual yang disuplai adalah 1,5 kali jumlah udara teoritis. Jumlah udara yang suplai dapat juga dinyatakan sebagai persentase kelebihan atau persentase

kekurangan udara. Jadi udara teoritis 150% adalah sebanding dengan kelebihan udara 50 %, udara teoritis 80%, adalah sebanding dengan kekurangan udara 20%.

Dua parameter yang sering dipakai untuk memberikan kuantifikasi jumlah bahan bakar dan udara di dalam sebuah proses pembakaran tertentu adalah rasio udara- bahan bakar dan kebalikannya, rasio bahan bakar-udara. Rasio udara- bahan bakar singkatnya adalah rasio jumlah udara didalam sebuah reaksi terhadap jumlah bahan bakar. Rasio ini dapat dituliskan dengan basis molar (mol udara dibagi dengan mol bahan bakar) atau dengan basis massa (massa udara dibagi dengan massa bahan bakar). Konversi diantara kedua ini dilakukan menggunakan berat molekul dari udara,  $M_{udara}$ , dan bahan bakar,  $M_{bahan\ bakar}$ .

$$\frac{Massa\ udara}{Massa\ bahan\ bakar} = \frac{mol\ udara \times M_{udara}}{\frac{mol\ udara}{mol\ bahan\ bakar} \left( \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} \right)} =$$

atau

$$AFR = \overline{AF} \left( \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} \right) \quad (2.4)$$

Dimana  $\overline{AF}$  adalah rasio udara-bahan bakar dengan basis molar dan AF adalah rasio dengan basis massa[12].

## 2.4 Indikator Performance Burner

*Performance* suatu *burner* dapat dikatakan baik atau tidak bisa dilihat dari beberapa indikator sebagai berikut[13]:

### 2.4.1 Distribusi temperatur

Distribusi temperatur menjadi salah satu indikator *performance burner*. Karena *burner* bisa di katakan baik jika bisa menghasilkan temperatur yang tinggi. Distribusi temperatur dapat diukur dengan *thermocouple* dengan beberapa titik penempatan. Sehingga bisa didapatkan data distribusi temperatur api.

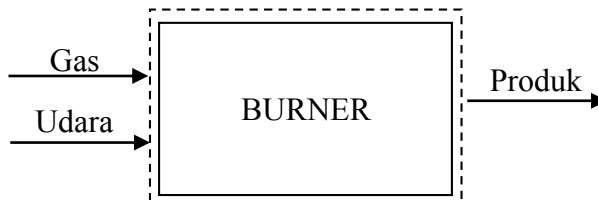
### 2.4.2 Daya burner

Daya burner yang didapatkan berupa Daya pembakaran yang terjadi pada burner, persamaan yang digunakan untuk mendapatkan energi pembakaran adalah dengan mengkalikan laju aliran massa bahan bakar dan udara dengan entalpi pembakaran. Di rumuskan sebagai berikut :

$$\text{Daya Burner} = \dot{m}_{\text{syngas}} h_{RP} \quad (2.5)$$

Untuk Perhitungan Entalpi Pembakaran ( $h_{RP}$ ) Gas Hasil Gasifikasi dapat dicari dengan memanfaatkan kandungan gas untuk menghitung entalpi pembakaran. Hal ini dapat dilakukan dengan menganggap pembakar (*burner*) sebagai sebuah sistem tertutup, dan pembakaran stokiometrik gas hasil gasifikasi terjadi di dalam pembakar (*burner*). Dalam melakukan perhitungan nilai entalpi pada reaksi pembakaran yang terjadi, beberapa asumsi digunakan untuk menyederhanakan perhitungan. Asumsi-asumsi tersebut diantaranya:

1. Batas volume atur ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 2.12
2. Sistem beroperasi dalam keadaan tunak.
3. Perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan.
4. Reaktan dan produk merupakan campuran gas yang berlaku seperti gas ideal.
5. Udara pembakaran yang digunakan adalah udara kering.



Gambar 2. 12 Skema Reaksi Pembakaran

Berdasarkan asumsi yang digunakan, maka kesetimbangan energi yang terjadi pada sistem pada Gambar 2.11 di atas adalah:

$$\begin{aligned} \text{entalpi reaktan} &= \text{entalpi produk} + Q \\ h_R &= h_P + Q \end{aligned}$$

Sehingga,

$-Q = h_P - h_R = \text{Entalpi pembakaran}$

$$h_{RP} = h_P - h_R$$

Karena reaktan dan produk merupakan suatu campuran gas dengan jumlah mol tertentu, maka dalam basis mol persamaan menjadi:

$$\bar{h}_{RP} = \sum_P n_p \bar{h}_p - \sum_R n_R \bar{h}_R \quad (2.6)$$

Berdasarkan definisi yang diperoleh dari referensi [9], maka entalpi spesifik  $\bar{h}$  pada tingkat keadaan diluar tingkat keadaan standar adalah penjumlahan entalpi pembentukan standar dengan  $\bar{h}_f^o$  perubahan entalpi spesifik antara tingkat keadaan standar dengan tingkat keadaan yang ditinjau  $\Delta \bar{h}$  Sehingga:

$$\bar{h}(T, p) = \bar{h}_f^o + [\bar{h}(T, p) - \bar{h}_{ref}(T_{ref}, p_{ref})] = \bar{h}_f^o + \Delta \bar{h} \quad (2.7)$$

Untuk mengetahui entalpi pembakaran dalam basis massa, maka perlu diketahui massa molar rata-rata dari gas, yaitu:

$$M_{rata-rata} = \sum n_i M_i \quad (2.8)$$

Maka entalpi pembakaran dalam basis massa adalah:

$$h_{RP} = \frac{\bar{h}_{RP}}{M_{rata-rata}} \quad (2.9)$$

Setelah didapatkan nilai entalpi pembakaran maka di butuhkan laju aliran massa ( $\dot{m}$ ). Laju aliran massa yang digunakan adalah laju aliran massa total yaitu penambahan laju aliran masa *syngas* ditambah dengan laju aliran massa udara.

### 2.4.3 Konsumsi bahan bakar spesifik (SFC)

Konsumsi bahan bakar spesifik ini laju aliran bahan bakar untuk memperoleh daya efektif. Sehingga dapat dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$SFC = \frac{\text{Laju Aliran bahan bakar}}{\text{Daya yang dihasilkan}} = \frac{\dot{m}_{gas}}{\text{Daya Burner}} \quad (2.10)$$

### 2.4.4 Efisiensi burner

Dari hasil perhitungan di atas, kita dapat menentukan besarnya nilai efisiensi *burner*. Besarnya efisiensi *burner* adalah :

$$\eta_{Burner} = \frac{\text{Daya Burner}}{\text{Daya Bahan Bakar}} \times 100 \quad (2.11)$$

Energi Bahan Bakar merupakan perkalian antara kandungan energi (LHV) dikalikan dengan laju aliran massanya. Sehingga:

$$\text{Daya Bahan Bakar} = \dot{m}_{gas} LHV_{gas} \quad (2.12)$$

Untuk Perhitungan *Low Heating Value* (LHV) dapat dicari dengan mengetahui komposisi bahan bakar gas dan dihitung dengan persamaan :

$$LHV_{GAS} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot LHV_i) \quad (2.13)$$

Sedangkan untuk laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) yang digunakan adalah laju aliran masa *syngas*.

## 2.5 Campuran Udara - Bahan Bakar

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal penting yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, udara (oksigen), kalor, dan reaksi kimia. Selain itu, perbandingan campuran udara dan bahan bakar memegang peranan yang penting pula dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran.

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung rasio campuran udara dan bahan bakar antara lain AFR (*Air-fuel Ratio*), FAR (*Fuel-air Ratio*), dan Rasio Ekuivalen ( $\Phi$ ).

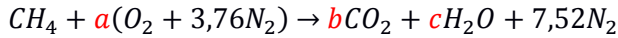
### 2.5.1 Rasio Udara-Bahan Bakar (Air-fuel Ratio/AFR)

Metode ini merupakan metode yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau.

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} = \frac{\dot{m}_{primary} + \dot{m}_{secondary}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} \quad (2.14)$$

Jika nilai *actual* lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan system dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai *actual* lebih kecil dari AFR stokiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada system dan dikatakan kaya bahan

bakar. Berikut adalah perhitungan kebutuhan udara teoritis dengan bahan bakar gas metana:



$$C: 1 = b$$

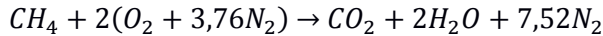
$$H: 4 = 2c \rightarrow c = 2$$

$$O: 2a = 2b + c$$

$$2a = 2(1) + 2$$

$$a = \frac{2+2}{2} = 2$$

Sehingga persamaannya menjadi:



$$\begin{aligned} AFR &= \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} \\ &= \frac{2 + (2 \times 3,76)}{1} \\ &= 9,52 \frac{kmol\ (udara)}{kmol\ (bahan\ bakar)} \end{aligned}$$

Rasio udara bahan bakar dengan basis massa adalah:

$$\begin{aligned} AF &= \left[ 9,52 \frac{kmol\ (udara)}{kmol\ (bahan\ bakar)} \right] \left[ \frac{28,97 \frac{kg\ (udara)}{kmol\ (udara)}}{16,04 \frac{kg\ (bahan\ bakar)}{kmol\ (bahan\ bakar)}} \right] \\ AF &= 17,19 \frac{kg\ (udara)}{kg\ (bahan\ bakar)} \end{aligned}$$

### 2.5.2 Rasio Ekuivalensi

Rasio ekuivalensi adalah rasio dari rasio aktual bahan bakar-udara untuk pembakaran dengan jumlah udara teoritis. Jika rasio ekuivalensi lebih kecil daripada satu, reaktan-reaktan membentuk apa yang disebut encer (*lean*). Jika rasio tersebut lebih besar daripada satu, reaktan-reaktan membentuk apa yang disebut cairan kental (*rich*) [12].

### 2.5.3 Udara Berlebih (Excess Air)

Dalam proses pembakaran sulit untuk mendapatkan pencampuran yang memuaskan antara bahan bakar dengan udara pada proses pembakaran aktual. Udara perlu diberikan dalam jumlah berlebih untuk memastikan terjadinya pembakaran secara sempurna seluruh bahan bakar yang ada.

Udara lebih (*excess air*) didefinisikan sebagai udara yang diberikan untuk pembakaran dalam jumlah besar dari jumlah teoritis yang dibutuhkan bahan bakar. Udara lebih dapat dideduksi dengan pengukuran komposisi produk pembakaran dalam keadaan kering (*dry basis*). Jika produk merupakan hasil pembakaran sempurna, maka presentasi udara berlebih dapat dinyatakan sebagai:

$$excess\ air = \left[ \left( \frac{CO_2\ stokiometrik}{CO_2\ aktual} \right) - 1 \right] \times 100\% \quad (2.15)$$

Dengan  $CO_2$  stokiometrik adalah volume  $CO_2$  stokiometrik ( $\alpha$ ) dalam flue gas kering

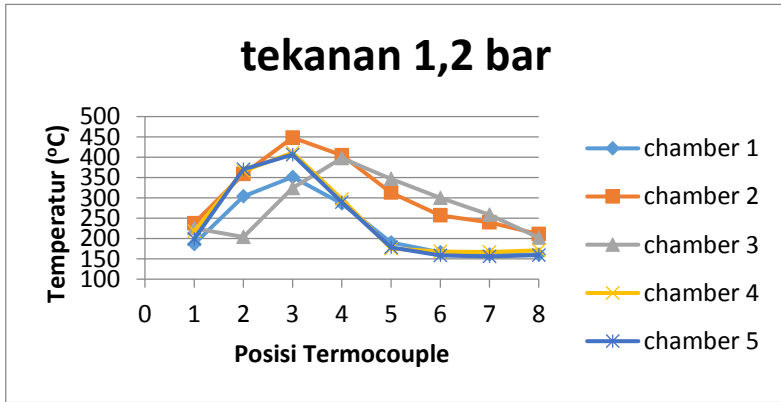
- Natural gas and producer gas;  $CO_2$  stokiometrik:  $11 < \alpha < 12\%$ .
- Commercial butane and propane:  $CO_2$  stokiometrik:  $\alpha = 14\%$ .
- Fuels;  $CO_2$  stokiometrik:  $15 < \alpha < 16\%$ .
- Marketed coal;  $CO_2$  stokiometrik:  $18 < \alpha < 20\%$ .

## 2.6 Peneliti Terdahulu

### 2.6.1 Penelitian Oleh Mahatma Pandima

Dari penelitian oleh mahatma yang berjudul Studi Eksperimen Burner *Type Partially Premixed* Dengan Bahan Bakar Syngas Biomassa Serbuk Kayu Dengan Variasi Dimensi *Mixed Chamber* didapatkan hasil burner yang memiliki distribusi temperatur api maksimum sebesar  $448,15\ ^\circ C$  pada tekanan syngas 1,2 bar dengan posisi *nozzle* 1 cm dari ujung *mixed chamber*. Serta diperoleh daya burner tertinggi sebesar 30,30 kW dan efisiensi tertinggi sebesar 47,17 % pada tekanan syngas 1,2 bar dengan

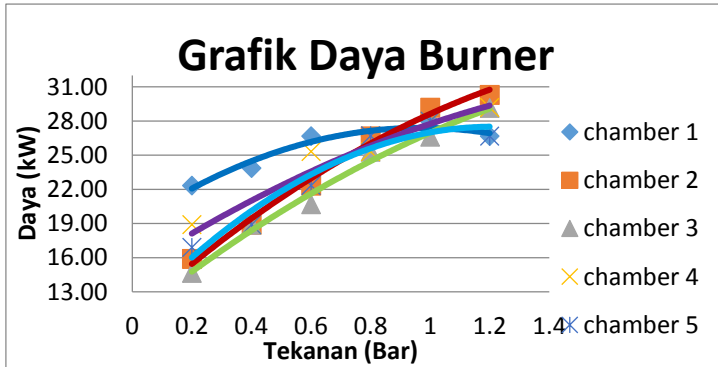
posisi *nozle* 1 cm, dan konsumsi bahan bakar spesifik optimum 0,82 kg/ kW h. Dari data hasil penelitian yang didapatkan dapat disimpulkan dengan hasil unjuk kerja yang didapat dimensi *mixed chamber* yang terbaik saat nozzle pada posisi 1 cm pada kondisi tekanan 1,2 bar[13].



Gambar 2. 13 Distribusi temperatur pada tekanan gas 1,2 bar

Pada grafik menunjukan perbandingan temperatur pada 5 posisi *Chamber* yang berbeda. Temperatur tertinggi yang di dapat pada posisi *termocouple* ke 3 adalah 445°C pada posisi *chamber* 2. Sedangkan termperatur terendah pada posisi *termocouple* ke 8 sebesar 158°C pada posisi *chamber* 5. Pada tekanan *syngas* 1,2 bar, posisi *chamber* 1,2,4 dan 5 memiliki temperatur tertinggi pada posisi *termocouple* ke 3 sedangkan posisi *chamber* 2 memiliki temperatur tertinggi pada posisi *termocouple* ke 4. Fenomena perbedaan ini disebabkan karena perbedanan panjang api. Pada *chamber* 2 terdapat penurunan temperatur pada posisi *termocouple* ke 2.



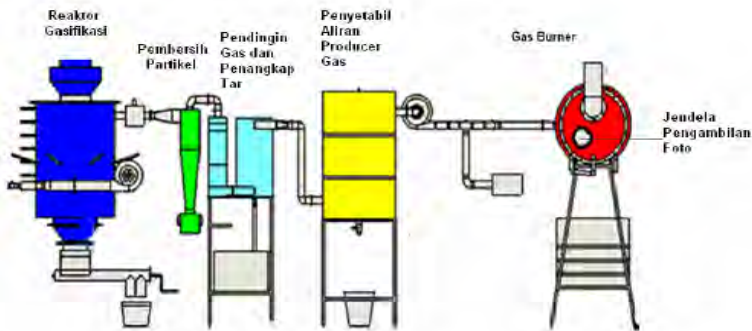


Gambar 2. 14 Grafik Daya Burner

Pada gambar grafik diatas menunjukkan daya pembakaran burner terhadap perubahan tekanan *syngas*. Pada umumnya seluruh posisi *chamber* mengalami peningkatan daya hanya saja pada beberapa pada *chamber* 0,1,2 dan 3 terjadi penurunan daya pada tekanan yang berbeda-beda. Pada *chamber* 1 terjadi penurunan pada tekanan *syngas* 0,8 bar. Pada *chamber* 2 terjadi penurunan pada tekanan *syngas* 1 bar. Pada *chamber* 3 terjadi penurunan pada tekanan *syngas* 1 bar. Dan pada *chamber* 3 terjadi penurunan pada tekanan *syngas* 0,8 bar. Pada *chamber* 1 terjadi penurunan pada tekanan *syngas* 0,6 bar.

### 2.6.2 Peneliti oleh Surjosatyo

Jurnal tentang “pembakaran gas hasil gasifikasi biomassa di *premixed* burner gas dengan metode 3D *computational fluid dynamics*” oleh Surjosatyo ,jurnal tersebut membahas tentang penelitian dengan metoda 3D *computational fluid dynamics* dan studi eksperimen pada *premixed* gas burner dengan bahan bakar biomassa. Penelitian burner gas dengan bahan bakar gas hasil gasifikasi dilakukan dengan variasi kecepatan gas dan perubahan jarak aksial terhadap ruang bakar[15].



Gambar 2. 15 Skema pengujian burner gas

Dari penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan berikut :

Tabel 2. 3 Perbandingan hasil eskperimental

Jarak aksial dari pusat ruang bakar (m)	Temperatur (°K)					
	Kecepatan 3 m/s		Kecepatan 6 m/s		Kecepatan 9 m/s	
	Eksperimental	Simulasi	Eksperimental	Simulasi	Eksperimental	Simulasi
0.3	1078	1128	698	751	501	533
0.6	769	815	488	528	412	454

### 2.6.3 Peneliti Oleh Yong Liu

Makalah ini menyajikan studi sistematis aliran dingin karakteristik bahan bakar pusat pusaran kaya burner. Medan aliran di outlet burner sesuai dengan variasi primary dan rasio *primary air* diukur. Dengan penurunan rasio *primary air* dan peningkatan rasio *secondary air*, intensitas *swirl* dari jet meningkat, pencampuran antara udara primer dan sekunder adalah ditingkatkan, dan difusi luar dari jet meningkat. Bersamaan titik awal dari zona resirkulasi bergerak menuju *outlet* dari *burner*. Juga zona ini diameter maksimum dan panjang aksial keduanya meningkat tapi lebih sangat dipengaruhi oleh perubahan daripada mengubah rasio *secondary air*. Pengaruh ini terbalik dengan memperhatikan intensitas turbulensi, menjadi lemah untuk mengubah rasio udara utama daripada mengubah rasio udara sekunder.

Tabel 2. 4 *Experimental Parameters Associated With Each Primary Air Ratio*

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Inner secondary air ratio	30%	35%	40%	45%	50%	55%
Primary air mass flow rate (kg/s)	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262	0.0262
Inner secondary air mass flow rate (kg/s)	0.0227	0.0264	0.0302	0.0340	0.0378	0.0415
Outer secondary air mass flow rate (kg/s)	0.0529	0.0492	0.0457	0.0416	0.0378	0.0339
swirl number	0.354	0.365	0.375	0.387	0.399	0.412
Air temperature (°C)	20					

Tabel 2. 5 *Experimental Parameters Associated With Each Inner Secondary Air Ratio*

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Primary air ratio	15%	20%	25%	27.5%	30%	35%
Primary air mass flow rate (kg/s)	0.0134	0.0189	0.0252	0.0288	0.0325	0.0407
Inner secondary air mass flow rate (kg/s)	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303
Outer secondary air mass flow rate (kg/s)	0.0454	0.0454	0.0454	0.0454	0.0454	0.0454
swirl number	0.453	0.422	0.391	0.375	0.358	0.321
Air temperature (°C)	20					

Dalam mengubah rasio udara sekunder, yaitu penurunan luar udara secondary air sambil meningkatkan udara sekunder bagian dalam, dan *vice versa*, kami mempertahankan tingkat total volume secondary air secara konstan. Dari karakteristik burner kami, sesuai rasio udara sekunder bagian dalam adalah 30%, 35%, 40%,

45%, 50%, dan 55%. Nilai spesifik primer untuk rasio udara sekunder adalah 27,5% sampai 72,5%. Tabel 2.5 berisi daftar parameter eksperimental yang diberikan pada rasio udara sekunder[16].

Distribusi udara memiliki dampak signifikan pada bidang aliran jet pada *swirl burners*. Dengan meningkatnya rasio *primary air* dari 15% sampai 35%, titik awal dari *recirculation zona* dari  $x/d=0,05$  sampai  $x/d=0,26$ , diameter maksimum menurun dari  $1.27d$  ke  $0.75d$  dan panjang aksial menurun dari  $1.43d$  ke  $0.68d$ . dengan naiknya *inner secondary air ratio*, dari 30% menjadi 55%, diameter maksimum menurun dari  $0,87d$  sampai  $1,13d$  dan panjang aksial meningkat dari  $0,91d$  sampai  $1,25d$ . dengan penurunan rasio *primary air* atau peningkatan rasio *inner secondary air*, intensitas pada *swirl* meningkat, pencampuran *primary air* dan *secondary air* meningkat dan difusi pada jet meningkat sehingga kekakuan pada jet menurun. Di satu sisi, pengaruh pada kecepatan aksial dan kecepatan tangensial dari perubahan rasio *primary air* lebih besar dibandingkan pada rasio *inner secondary air*. Di sisi lain, dibandingkan pada perubahan rasio *inner secondary air*, perubahan rasio *primary air* menjadi berkurang dampaknya pada kecepatan radial dan *turbulence intensity*.

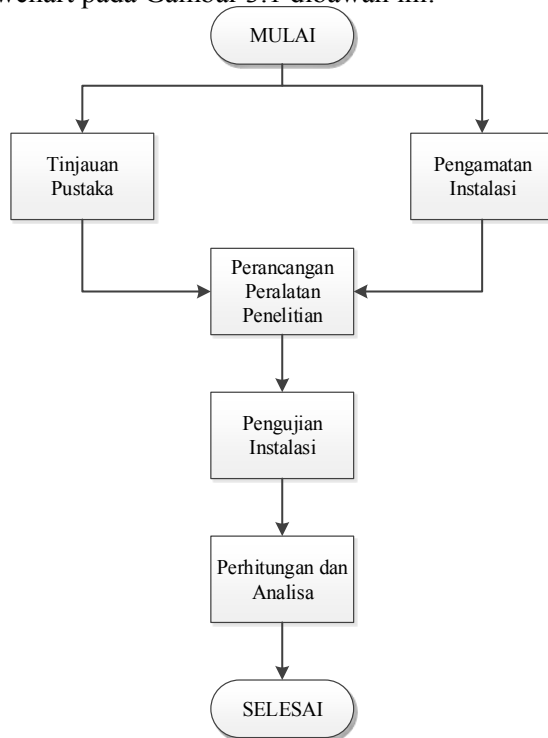
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 1.1 Tahapan Pengerjaan Tugas Akhir

Agar penelitian ini dapat mencapai tujuan yang diinginkan seperti yang tercantum pada tujuan, maka perlu dilakukan langkah – langkah yang sesuai dengan prosedur pengerjaan. Prosedur analisa akan dijelaskan melalui flowchart pada Gambar 3.1 dibawah ini:



Gambar 3. 1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir

## **1.2 Penjelasan Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir**

Proses dalam menyelesaikan tugas akhir ini melalui beberapa tahap sebagai berikut:

### **1.2.1 Tinjauan Pustaka**

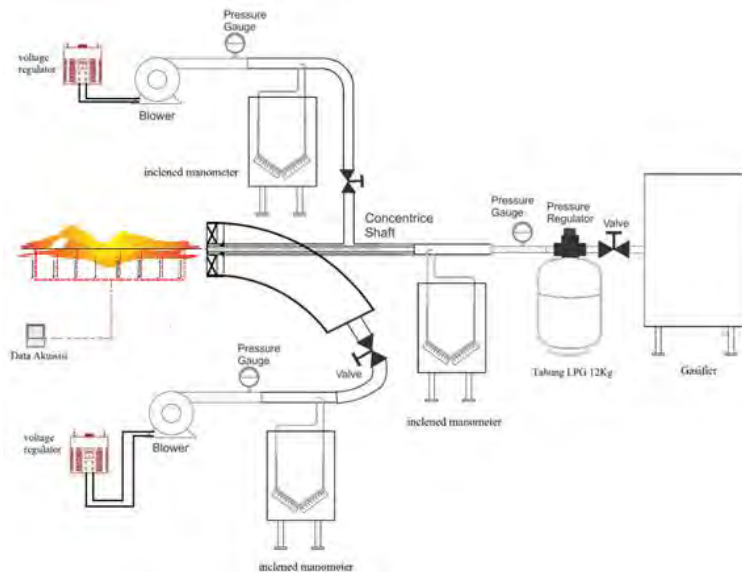
Tahapan awal adalah melakukan studi literatur dengan tujuan untuk merangkum teori-teori dasar, acuan secara umum dan khusus, serta untuk memperoleh berbagai informasi pendukung lainnya yang berhubungan dengan pengerjaan Tugas Akhir ini. Studi literatur ini diperoleh dari buku-buku yang berhubungan dengan proses penelitian dan jurnal-jurnal penelitian yang berhubungan dengan penelitian ini. Selain itu studi literatur juga dilakukan dengan cara observasi instalasi dan tambahan pengetahuan melalui internet. Pada studi literatur ini juga meliputi mencari dan mempelajari bahan pustaka yang berkaitan dengan segala permasalahan mengenai burner dengan bahan bakar *syngas* serbuk kayu dan perbandingan variasi *primary and secondary air*.

### **1.2.2 Pengamatan Instalasi**

Setelah membaca studi literatur, kami melakukan pengamatan instalasi yang dirancang sebelumnya oleh Mahatma dan Henik secara langsung. Pengamatan instalasi ini dimaksudkan untuk memperoleh gambaran lebih detail mengenai perancangan sebuah burner berbahan bakar *syngas* beserta karakteristik dan permasalahannya. Dari pengamatan instalasi ini kami mempunyai rencana untuk mengupgradenya dengan *variasi primary and secondary air* dan mengoptimasi suhu nyala api hingga mencapai 1000°C.

### **1.2.3 Perancangan Peralatan Penelitian**

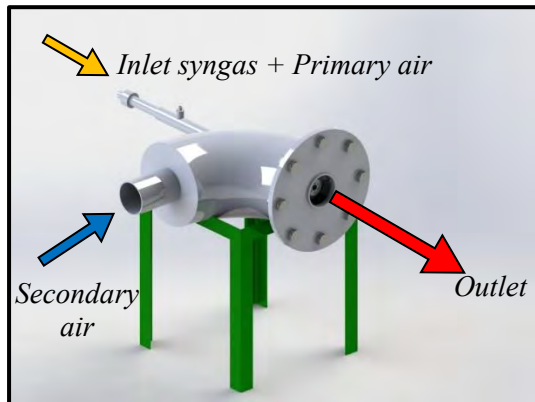
Dalam penelitian ini, peralatan yang digunakan seperti Gambar 3.2 dibawah ini:



Gambar 3. 2 Skema Penelitian

Adapun peralatan penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. *Burner*



Gambar 3. 3 *Burner*



2. *Blower* Sentrifugal

*Blower* Sentrifugal ini digunakan pada saluran udara pembakar, berfungsi untuk mengalirkan udara masuk agar pembakaran lebih sempurna. Dengan spesifikasi berikut :

Merk	: Generic
Tipe	: sentrifugal
Berat	: 5 kg
Daya	: 370 W
Diameter Output	: 3"
Kecepatan	: 3000 Rpm



Gambar 3. 4 *Blower* Sentrifugal

3. Pemantik api

Pemantik api berfungsi untuk memantikkan/menyalakan api pada bahan bakar *syngas* sehingga pembakaran dapat terjadi.



Gambar 3. 5 Pemantik Api

4. *Thermocouple type K*

*Thermocouple* digunakan mengetahui temperatur api hasil pembakaran. *Thermocouple* yang digunakan adalah type K. Type ini memiliki range temperatur  $50^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$ .



Gambar 3. 6 *Thermocouple Type K*

5. *Pressure Gauge*

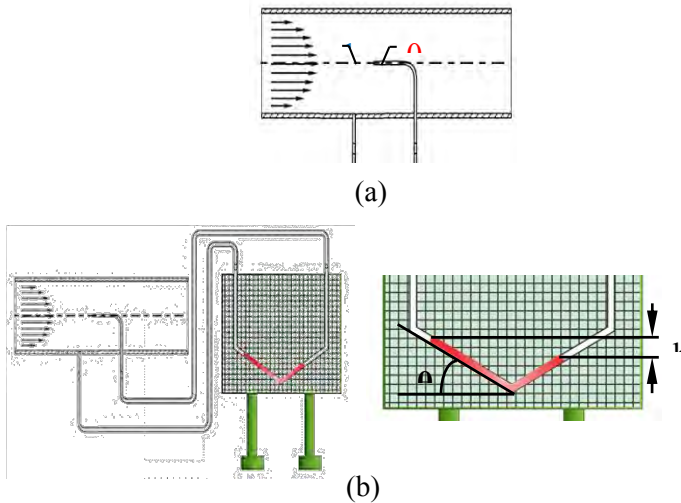
*Pressure gauge* yang digunakan berskala maksimal 100 mbar. Alat ini digunakan untuk mengukur tekanan suplai bahan bakar gas yang dikonsumsi oleh *burner*.



Gambar 3. 7 *Pressure Gauge*

6. *Pitot static tube dan Inclined manometer*

Alat ini dipergunakan untuk mengukur jumlah udara masuk yang disuplai ke ruang bakar.



Gambar 3. 8(a) Konfigurasi *pitot static tube* (b) *Inclined Manometer*  
 $\theta = 15^\circ$

*Pitot static tube* dihubungkan dengan *inclined manometer* untuk mengetahui besarnya perbedaan ketinggian cairan pada *inclined manometer* yang nantinya akan digunakan untuk mengetahui *mass flow rate* udara dan syngas yang masuk ke ruang bakar dengan menggunakan persamaan *Bernoulli* sebagai berikut:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \quad (3.1)$$

Dimana:

$P_2$  : tekanan stagnasi pada titik 2 (Pa)

$P_1$  : tekanan statis pada titik 1 (Pa)

$\rho$  : massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_1$  : kecepatan di titik 1 (m/s)

$V_2$  : kecepatan di titik 2, kecepatan pada P stagnasi = 0 (m/s)

Dengan mengasumsikan  $\Delta z = 0$  maka persamaannya menjadi:

$$\frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho} \quad (3.2)$$

Sehingga dari persamaan diatas untuk mendapatkan kecepatan udara yang masuk ke dalam ruang bakar menjadi:

$$V_1 = V = \sqrt{2 \left( \frac{P_2 - P_1}{\rho} \right)} \left( \frac{m}{s} \right) \quad (3.3)$$

Dimana:

$$P_2 - P_1 = \rho_{red\ oil} \times g \times l = \rho_{H_2O} \times g \times l (SG_{red\ oil})$$

$\Delta l = 2(l_2 - l_1) \sin \theta$  dan  $(l_2 - l_1)$  adalah perbedaan ketinggian cairan pada inclined manometer dengan  $\theta = 15^\circ$ , maka persamaan menjadi:

$$V = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{H_2O} \times SG_{red\ oil} \times g \times 2(\Delta l) \sin \theta}{\rho}} \left( \frac{m}{s} \right) \quad (3.4)$$

Dimana:

$SG_{red\ oil}$ : *specific gravity red oil*

$\rho_{H_2O}$  : massa jenis air  $T=27^\circ C$  ( $997\text{ kg/m}^3$ )

$\rho_{udara}$  : massa jenis udara  $T=32^\circ C$  ( $1,1447\text{ kg/m}^3$ )

$L$  : selisih ketinggian cairan pada manometer (m)

$\theta$  : besar sudut yang digunakan pada manometer  $V$  ( $^\circ$ )

Namun  $V$  merupakan kecepatan maksimal, terlihat dari profil kecepatan aliran pada *internal flow*. Hal ini dikarenakan posisi pitot berada pada *centerline* pipa. Sehingga perlu dirubah menjadi *average velocity* ( $\bar{V}$ ) yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\bar{V}}{V_{max}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (3.5)$$

Dimana:

$\bar{V}$  : Kecepatan rata – rata (m/s)

$V_{max}$  : Kecepatan maksimal dari profil kecepatan aliran.

$n$  : *variation of power law exponent*. Yang di rumuskan sebagai berikut:

$$n = -1,7 + 1,8 \log Re_{V_{max}} \quad (3.6)$$

Nilai dari  $Re$  dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.7)$$

Dimana:

Re : bilangan *reynold number*

$\rho$  : massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )

D : diameter (m)

$\mu$  : *dynamic viscosity* ( $\text{N.s/m}^2$ )

untuk  $Re_{V_{max}} > 2 \times 10^4$  (aliran turbulen).

Sedangkan untuk aliran laminar dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$V_{max} = 2\bar{V} \quad (3.8)$$

Penggunaan *pitot tube with static wall pressure tap and inclined manometer* digunakan untuk memperoleh mass flow *syngas* dan *mass flow* udara yaitu langkah-langkahnya sebagai berikut:

1. Pada setiap variasi tekanan *syngas* dan udara lihat beda ketinggian masing-masing *inclined manometer*.
2. Dalam percobaan ini tekanan dan voltage regulator masing-masing memiliki 5 macam variasi. Variasi tekanan yang digunakan adalah 0,2 bar, 0,4 bar, 0,6 bar, 0,8 bar dan 1 bar. Kemudian variasi *voltage regulator*.
3. Kemudian diperoleh perbedaan ketinggian *red water* yaitu  $\Delta l$  pada masing-masing *inclined manometer syngas* dan udara.
4. Hasil nilai dari perbedaan ketinggian *red water* yang didapatkan dimasukkan pada persamaan berikut ini:

$$V_{udara} = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{H_2O} \times SG_{red\ oil} \times g \times 2(\Delta l) \sin \theta}{\rho_{udara}}} \quad (3.9)$$

$$V_{syngas} = \sqrt{\frac{2 \times \rho_{H_2O} \times SG_{red\ oil} \times g \times 2(\Delta l) \sin \theta}{\rho_{syngas}}} \quad (3.10)$$

5. Hasil nilai dari  $V_{udara}$  dan  $V_{syngas}$  dimasukkan ke dalam persamaan sebagai berikut ini:

$$\dot{m}_{udara} = \rho_{udara} \times V_{udara} \times A_{inlet\ udara} \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{syngas} = \rho_{syngas} \times V_{syngas} \times A_{syngas} \quad (3.12)$$

Dengan  $A = \frac{1}{4}\pi D^2$ , dimana D adalah diameter dari pipa *inlet syngas* dan diameter pipa *inlet* udara.

6. Maka akan didapatkan hasil nilai dari  $\dot{m}_{udara}$  dan  $\dot{m}_{syngas}$
7. Ulangi langkah 2 sampai 6 dengan variasi tekanan 0,2 bar sampai 1 bar dan variasi penambahan *voltage regulator* sebesar 100V sampai 200V.

#### 7. Voltage regulator

Alat ini berfungsi sebagai pengatur tegangan udara yang masuk ke dalam ruang bakar.



Gambar 3. 9 Voltage Regulator

### 1.3 Perencanaan dan perencanaan eksperimen

#### 1.3.1 Parameter Percobaan

Dalam perancangan eksperimen ini ada beberapa parameter yang ingin didapatkan dalam percobaan ini dengan menetapkan parameter input. Parameter-parameter tersebut dinyatakan sebagaimana dinyatakan dalam Tabel 3.1 yaitu :

Tabel 3. 1 Perencanaan percobaan

Parameter input		Parameter output		Visualisasi
Tetap	Berubah	Pengukuran	Perhitungan	
Bahan bakar <i>syngas</i> <i>biomassa</i> serbuk kayu	Tekanan bahan bakar: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 (bar)	Perbedaan ketinggian level manometer ( $\Delta l$ ) bahan bakar Temperatur nyala api	$\dot{m}_{syngas}$	Nyala api
Diameter = 10 mm	$\dot{m}_{primary}$ : 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03 (kg/s) $\dot{m}_{secondary}$ : 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08 (kg/s)	Perbedaan ketinggian level manometer ( $\Delta l$ ) udara	Daya, efisiensi, konsumsi bahan bakar	Panjang api

Tabel 3. 2 Rancangan Eksperimen

KONDISI BAHAN BAKAR (bar)	PRIMARY AIR (kg/s)	SECONDARY AIR (kg/s)
P <sub>1</sub> = 0,2	0,01	0,04
P <sub>2</sub> = 0,4	0,015	0,05
P <sub>3</sub> = 0,6	0,02	0,06
P <sub>4</sub> = 0,8	0,025	0,07
P <sub>5</sub> = 1	0,03	0,08

Tabel 3. 3 *Mapping* Rancangan Eksperimen

<i>PRIMARY AIR</i>	<i>SECONDARY AIR</i>	Perbandingan <i>primary</i> dan <i>secondary air</i>
0,01	0,04	20%
	0,05	16%
	0,06	14%
	0,07	12,5%
	0,08	11%
0,015	0,04	27%
	0,05	23%
	0,06	20%
	0,07	17,6%
	0,08	15,7%
0,02	0,04	33%
	0,05	28%
	0,06	25%
	0,07	22%
	0,08	20%
0,025	0,04	38%
	0,05	33%
	0,06	29%
	0,07	26%
	0,08	24%
0,03	0,04	43%
	0,05	37%
	0,06	33%
	0,07	30%
	0,08	27%

### 1.3.2 Langkah Persiapan Alat

Langkah awal yang dilakukan untuk pengujian adalah tahap persiapan. Berikut tahapan-tahapan persiapan :



1. Persiapkan seluruh alat yang akan digunakan seperti *Burner*, *Blower*, dan Alat ukur.
2. Pastikan semua alat yang akan digunakan dalam kondisi baik dan berfungsi normal.
3. Susun peralatan yang telah disiapkan sesuai dengan gambar skema alat pengujian (Gambar 3.2).
4. Pastikan alat tersusun dengan baik dan siap untuk melakukan pengujian.

### 1.3.3 Langkah Pengujian

Tahapan pengujian ini merupakan tahapan menfungsikan *burner* gas dan menghasilkan api. Berikut langkah-langkah yang dilakukan :

1. Sambungkan inlet *syngas* ke *burner*.
2. Pastikan tidak terjadi kebocoran pada rangkaian alat pengujian.
3. Atur *pressure regulator syngas* dengan awal penyalan sebesar  $P = 0,2$  bar.
4. Nyalakan api dengan pemantik api di ujung *burner*.
5. Nyalakan blower untuk masukan secondary air
6. Tunggu nyala api sampai stabil dan ambil data.

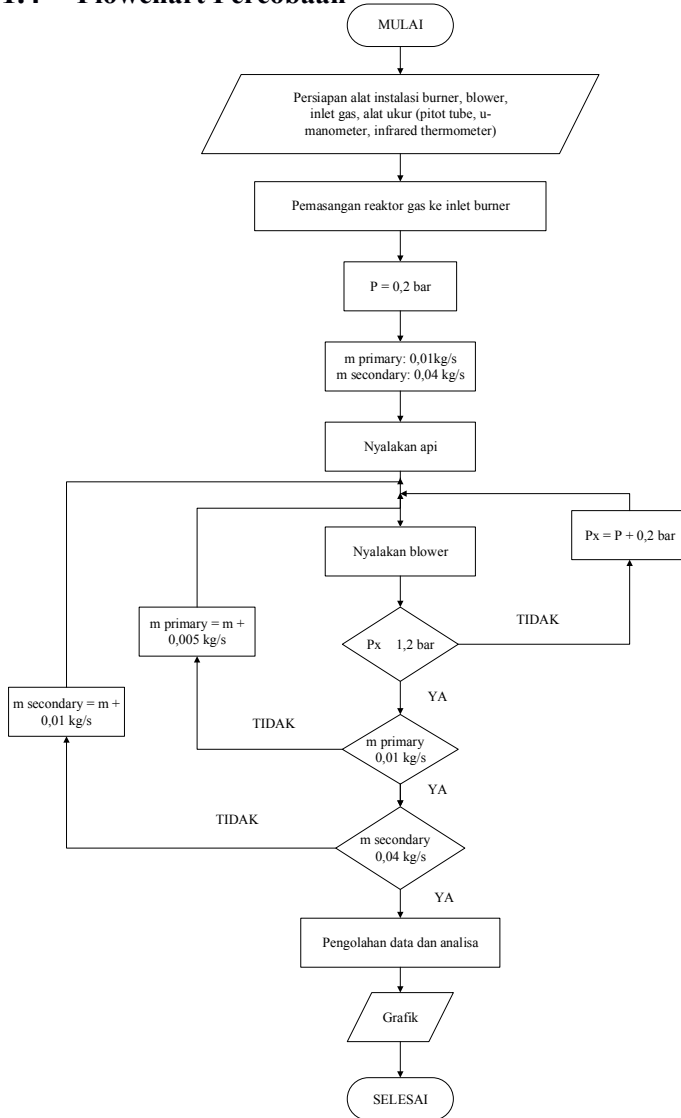
### 1.3.4 Langkah pengambilan data

Pada tahap pengambilan data dengan memvariasikan tekanan *syngas* dan, bukaan *voltage regulator blower* langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

1. Atur tekanan awal syngas 0,2 bar.
2. Variasikan  $\dot{m}_{primary}$  sebesar 0,01 kg/s dan  $\dot{m}_{secondary}$  sebesar 0,04 kg/s.
3. Tunggu beberapa menit.
4. Ambil data.
5. Ulangi percobaan 1 sampai 4 dengan variasi tekanan syngas 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 (bar).

6. Ulangi percobaan 1 sampai 5 dengan variasi  $\dot{m}_{primary}$  sebesar 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03 (kg/s) dan  $\dot{m}_{secondary}$ : 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08 (kg/s).
7. Setelah pengambilan data selesai, posisikan kembali pressure regulator pada posisi 0 dan matikan blower pada posisi voltage regulator 0.

## 1.4 Flowchart Percobaan



Gambar 3. 11 Flowchart Percobaan

## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan menjelaskan mengenai perhitungan-perhitungan yang diperlukan dalam penelitian. Perhitungan yang dimaksud adalah perhitungan dari karakterisasi unjuk kerja *burner* gas antara lain daya burner, efisiensi, *air fuel ratio* (AFR) dan konsumsi bahan bakar spesifik serta hasil analisa dan pembahasan grafik, distribusi temperatur dan visualisasi nyala api. Berikut adalah data-data yang didapat dari hasil penelitian:

### 1.1 Data hasil penelitian

#### 1.1.1 Properties Bahan Bakar

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan Mahatma [13], kandungan yang ada dalam gas adalah sebagai berikut:

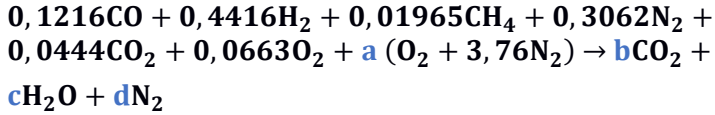
Tabel 4. 1 Besarnya komposisi kandungan *syngas* serbuk kayu

Komposisi	Presentase massa (%)	Berat Mol (kg/kmol) [12]	(kmol.%)	Basis mol (kmol.%)
$CO$	19,57	28,01	0,0069	0,1216
$H_2$	5,34	2,106	0,0253	0,4416
$CH_4$	1,81	16,04	0,0011	0,0196
$N_2$	11,23	28,01	0,0175	0,3062
$CO_2$	49,26	44,01	0,0025	0,0444
$O_2$	12,79	32	0,0038	0,0663
TOTAL			0,0574	1

#### 1.1.2 Analisa Reaksi Pembakaran

Berikut adalah hasil reaksi pembakaran gas hasil gasifikasi biomassa serbuk kayu. Koefisien reaksi pembakaran

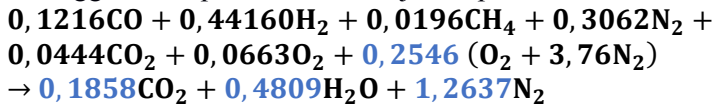
gas dapat diperoleh dari basis mol *syngas* yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.



Menyetarakan koefisien reaktan dan produk persamaan reaksi pembakaran:

$$\begin{aligned} \text{C} &: 0,12168 + 0,01965 + 0,04444 = b \\ & \qquad \qquad \qquad b = 0,1858 \\ \text{H} &: (2 \times 0,44160) + (4 \times 0,01965) = 2c \\ & \qquad \qquad \qquad c = 0,4809 \\ \text{O} &: 0,12168 + (2 \times 0,04444) + (2 \times 0,06634) + 2a = 2b + c \\ & \qquad \qquad \qquad 0,12168 + (2 \times 0,04444) + (2 \times 0,06634) + 2a = (2 \times 0,1858) + 0,4809 \\ & \qquad \qquad \qquad a = 0,2546 \\ \text{N} &: (2 \times 0,30629) + (a \times 3,76 \times 2) = 2d \\ & \qquad \qquad \qquad (2 \times 0,30629) + (0,2546 \times 3,76 \times 2) = 2d \\ & \qquad \qquad \qquad d = 1,2637 \end{aligned}$$

Sehingga reaksi pembakaran menjadi seperti berikut ini:



Tabel 4. 2 *Molecular Weight* pada masing-masing komposisi *syngas* serbuk kayu

Komposisi	Presentase massa (%)	<i>Molecular Weight</i> (kg/kmol)
CO	19,57	28,01
H <sub>2</sub>	5,34	2,106
CH <sub>4</sub>	1,81	16,04
N <sub>2</sub>	11,23	28,01

$CO_2$	49,26	44,01
$O_2$	12,79	32

Untuk menghitung rasio udara bahan bakar dengan basis massa diperlukan *molecular weight* yang didapatkan dari Tabel A1 Termodinamika, berikut adalah perhitungan pada masing-masing komponen syngas serbuk kayu:

$$\begin{aligned}
 CO &: \frac{19,57}{100} \times 28,01 = 5,481 \frac{kg}{kmol} \\
 H_2 &: \frac{5,34}{100} \times 2,016 = 0,0264 \frac{kg}{kmol} \\
 CH_4 &: \frac{1,81}{100} \times 16,04 = 0,2903 \frac{kg}{kmol} \\
 CO_2 &: \frac{11,23}{100} \times 44,01 = 4,9423 \frac{kg}{kmol} \\
 N_2 &: \frac{49,26}{100} \times 28,01 = 13,7977 \frac{kg}{kmol} \\
 O_2 &: \frac{12,79}{100} \times 32 = 4,0928 \frac{kg}{kmol} \\
 \text{TOTAL} &= 28,6305 \frac{kg}{kmol}
 \end{aligned}$$

Rasio udara bahan bakar dengan basis mol adalah:

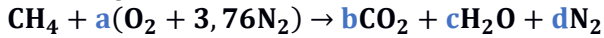
$$\begin{aligned}
 \overline{AF} &= \frac{0,2546 + 0,2546(3,76)}{1} \\
 &= 1,212 \frac{\text{kmol(udara)}}{\text{kmol (bahan bakar)}}
 \end{aligned}$$

Rasio udara bahan bakar dengan basis massa adalah:

$$\begin{aligned}
 AF &= \left[ 1,212 \frac{\text{kmol (udara)}}{\text{kmol (bahan bakar)}} \right] \left[ \frac{28,97 \frac{\text{kg (udara)}}{\text{kmol (udara)}}}{28,6305 \frac{\text{kg (bahan bakar)}}{\text{kmol (bahan bakar)}}} \right] \\
 AF &= 1,2263 \frac{\text{kg (udara)}}{\text{kg (bahan bakar)}}
 \end{aligned}$$

Sedangkan berikut adalah kebutuhan udara teoritis untuk pembakaran tuntas terhadap gas metana. Untuk reaksi ini,

produk yang dihasilkan hanya mengandung karbondioksida, air dan nitrogen. Reaksi tersebut adalah:



Menyetarakan koefisien reaktan dan produk persamaan reaksi pembakaran:

$$C : b = 1$$

$$H : 4 = 2c$$

$$c = 2$$

$$O : 2a = 2b + c$$

$$2a = (2 \times 1) + 2$$

$$a = 2$$

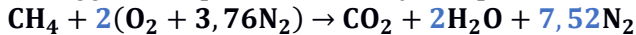
$$N : a \times 3,76 \times 2 = 2d$$

$$3,76a = d$$

$$d = 3,76 \times 2$$

$$d = 7,52$$

Sehingga reaksi pembakaran menjadi seperti berikut ini:



Rasio udara bahan bakar dengan basis mol adalah:

$$\overline{AF} = \frac{2 + 2(3,76)}{1} = 9,52 \frac{\text{kmol(udara)}}{\text{kmol (bahan bakar)}}$$

Rasio udara bahan bakar dengan basis massa adalah:

$$AF$$

$$= \left[ 9,52 \frac{\text{kmol (udara)}}{\text{kmol (bahan bakar)}} \right] \left[ \frac{28,97 \frac{\text{kg (udara)}}{\text{kmol (udara)}}}{16,04 \frac{\text{kg (bahan bakar)}}{\text{kmol (bahan bakar)}}} \right]$$

$$AF = 17,19 \frac{\text{kg (udara)}}{\text{kg (bahan bakar)}}$$

### 1.1.3 Low Heating Value (LHV) syngas

Dari nilai presentase komposisi syngas dapat dilakukan perhitungan LHV syngas biomassa serbuk kayu, berikut adalah persamaan untuk mencari LHV *syngas*.

$$LHV_{GAS} = \sum_{i=1}^n (Y_i \cdot LHV_i)$$

Dimana:

$Y_i$  : konsentrasi gas yang terbakar dalam basis massa

$LHV_i$  : nilai kalor rendah dari gas yang terbakar (kJ/kg)

Nilai  $LHV_i$  dapat dilihat pada tabel di bawah  $LHV_i$  dari gas yang terbakar ( $CO, CH_4, H_2$ ). Berikut Tabel komposisi LHV *syngas*:

Tabel 4. 3 *Low Heating Value* (LHV) [17]

Nilai kalor bawah ( $LHV_i$ ) gas yang terbakar		
CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)
10110	119494	49915

- $Y_i$  untuk gas CO = 19,57% = 0,1957
- $Y_i$  untuk gas H<sub>2</sub> = 5,34% = 0,0534
- $Y_i$  untuk gas CH<sub>4</sub> = 1,81% = 0,0181

$$LHV_{syngas} = \sum_{i=1}^n (0,1957 \times 1101110) + (0,0534 \times 119494) + (0,0181 \times 49915)$$

$$LHV_{syngas} = 9262,96 \frac{kJ}{kg}$$

## 1.2 Perhitungan Data

Pada langkah perhitungan data akan didapatkan hasil penelitian. Data yang didapatkan diantaranya adalah temperatur api dan  $\dot{m}_{syngas}$ . Dari data yang diperoleh tersebut maka dapat



dihitung sehingga didapatkan daya burner, konsumsi bahan bakar spesifik dan efisiensi *burner*.

### 1.2.1 Perhitungan Air Fuel Ratio (AFR)

Perhitungan Air Fuel Ratio (AFR) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{syngas}}$$

Dengan menggunakan data  $\dot{m}_{primary} = 0,01 \frac{kg}{s}$  ,  
 $\dot{m}_{secondary} = 0,07 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{syngas} = 0,02244 \frac{kg}{s}$

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{syngas}}$$

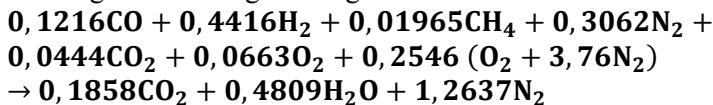
$$AFR = \frac{\dot{m}_{primary} + \dot{m}_{secondary}}{\dot{m}_{syngas}}$$

$$AFR = \frac{(0,01 + 0,07) \frac{kg}{s}}{0,02244 \frac{kg}{s}}$$

$$AFR = 3,5650$$

### 1.2.2 Perhitungan entalpi pembakaran

Dengan mengacu pada persamaan reaksi pembakaran *syngas* yang sudah disetarakan sebelumnya, maka dapat dihitung kesetimbangan energi.



Maka kesetimbangan energi yang terjadi pada reaksi pembakaran diatas adalah:

$$\text{entalpi reaktan} = \text{entalpi produk} + Q$$

$$h_R = h_P + Q$$

$$-Q = h_P - h_R = \text{entalpi pembakaran}$$

$$h_{RP} = h_P - h_R$$

Karena reaktan dan produk merupakan suatu campuran gas dengan jumlah mol tertentu, maka dalam basis mol persamaan menjadi:

$$\bar{h}_{RP} = \sum_P n_p \bar{h}_P - \sum_R n_R \bar{h}_R$$

### 1.2.1.1 Perhitungan entalpi pembakaran produk

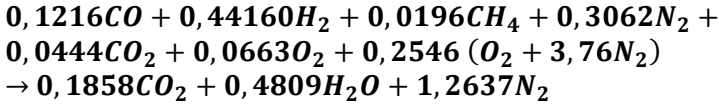
Dengan melakukan contoh perhitungan pada  $\dot{m}_{primary} = 0,01 \frac{kg}{s}$ ,  $\dot{m}_{secondary} = 0,05 \frac{kg}{s}$ ,  $P = 0,6 \text{ bar}$  dan  $T = 583^\circ K$

$$\begin{aligned} \sum_P n_p \bar{h}_P &= 0,1858[(\bar{h}_f^0) + (\Delta \bar{h})]_{CO_2} + 0,4809[(\bar{h}_f^0) + (\Delta \bar{h})]_{H_2O} \\ &+ 1,2637[(\bar{h}_f^0) + (\Delta \bar{h})]_{N_2} \\ \sum_P n_p \bar{h}_P &= 0,1858[(-393520 + 12317)]_{CO_2} + 0,4809[(-241800 + 9820,3)]_{H_2O} + 1,2637[(0 + 8329)]_{N_2} \\ \sum_P n_p \bar{h}_P &= -171861,1978 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

Nilai entalpi pembentukan standar untuk  $CO_2$ ,  $H_2O$  dan  $N_2$  diperoleh dari (Tabel A-25 *Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure*). Sedangkan nilai entalpi spesifik untuk  $CO_2$ ,  $H_2O$  dan  $N_2$  diperoleh dari (Tabel A-23 *Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure*) melalui interpolasi temperatur rata-rata keluaran syngas dari burner pada masing-masing pengambilan data.

### 1.2.1.2 Perhitungan entalpi pembakaran reaktan

Dengan melakukan contoh perhitungan pada  $\dot{m}_{primary} = 0,01 \frac{kg}{s}$ ,  $\dot{m}_{secondary} = 0,05 \frac{kg}{s}$ ,  $P = 0,6 \text{ bar}$  dan  $T = 583^\circ K$



$$\begin{aligned} \sum_P n_R \bar{h}_R &= 0,1216[(\bar{h}_f^0) + (\Delta \bar{h})]_{CO} + 0,4416[(\bar{h}_f^0) + (\bar{c}_p \cdot \Delta T)]_{H_2} + 0,0196[(\bar{h}_f^0) + (\bar{c}_p \cdot \Delta T)]_{CH_4} + \\ &0,0444[(\bar{h}_f^0) + (\Delta \bar{h})]_{N_2} + 0,0663[(\bar{h}_f^0) + (\Delta \bar{h})]_{CO_2} + \\ &0,3062[(\bar{h}_f^0) + (\Delta \bar{h})]_{O_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_P n_R \bar{h}_R &= 0,12168[(-110530 + 8362)]_{CO} + \\ &0,4416[29,329 + (583 - 300)]_{H_2} + 0,01965[(-74850 + (51,156(583 - 300)))]_{CH_4} + \\ &0,04444[21478 - 9431]_{N_2} + 0,06634[17386 - 8736]_{CO_2} + 0,30629[17052 - 8723]_{O_2} \end{aligned}$$

$$\sum_P n_R \bar{h}_R = -6291,45 \text{ kJ/kmol}$$

Nilai entalpi pembentukan standar untuk CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> diperoleh dari Tabel A-25 (*Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure*). Sedangkan entalpi spesifik untuk CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> diperoleh dari Tabel A-23 (*Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure*) melalui interpolasi temperatur rata-rata keluaran *syngas* dari *burner* pada masing-masing pengambilan data.

Sedangkan entalpi spesifik untuk H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> diperoleh melalui persamaan:

$$(\Delta \bar{h}) = \bar{c}_p \cdot \Delta T$$

Harga  $\bar{c}_p$  diperoleh dari Tabel A-21 adalah:

$$\bar{c}_{p_{H_2}} = 29,329 \text{ kJ/kmol. K}$$

$$\bar{c}_{p_{CH_4}} = 51,156 \text{ kJ/kmol. K}$$

Sehingga entalpi pembakaran gas hasil pembakaran dalam basis mol adalah:

$$\bar{h}_{RP} = \sum_P n_p \bar{h}_P - \sum_R n_R \bar{h}_R$$

$$\bar{h}_{RP} = [-171861,1978 - (-6291,45)] \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{RP} = -165569,7478 \text{ kJ/kmol}$$

Untuk mengetahui entalpi pembakaran dalam basis massa, maka perlu diketahui massa molar rata-rata dari gas, yaitu:

$$M_{rata-rata} = \sum n_i \cdot M_i$$

Tabel 4. 4 Koefisien reaktan kandungan gas

Komposisi	Koefisien Reaktan	Mi	Molar rata-rata
CO	0.1957	28.01	5.48
H <sub>2</sub>	0.0534	2.106	0.11
CH <sub>4</sub>	0.0181	16.04	0.29
N <sub>2</sub>	0.4926	28.01	13.80
CO <sub>2</sub>	0.1123	44.01	4.94
O <sub>2</sub>	0.1279	32	4.09
TOTAL			28,97

Maka entalpi pembakaran dalam basis massa adalah:

$$h_{RP} = \left[ \frac{\bar{h}_{RP}}{M_{rata-rata}} \right]$$

$$h_{RP} = \frac{-165569,7478 \text{ kJ/kmol}}{28,72 \text{ kJ/kg}}$$

$$h_{RP} = 5764,963 \text{ kJ/kg}$$

#### 4.2.3 Perhitungan Energi Pembakaran

Perhitungan energi pembakaran dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{energi pembakaran} &= \dot{m}_{\text{syngas}} \times LHV \\ \text{energi pembakaran} &= 0,02805 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 9262,968 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \text{energi pembakaran} &= 259,8262 \text{ kW} \end{aligned}$$

#### 4.2.4 Perhitungan daya burner

Untuk menghitung daya burner dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{daya burner} &= \dot{m}_{\text{syngas}} \times h_{RP} \\ \text{daya burner} &= 0,02805 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 5764,963 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \text{daya burner} &= 141,6452 \text{ kW} \end{aligned}$$

#### 4.2.5 Efisiensi Burner

Dari perhitungan daya burner dan energi pembakaran dapat ditentukan efisiensi burner, yaitu:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{burner}} &= \frac{\text{daya burner}}{\text{energi pembakaran}} \times 100\% \\ \eta_{\text{burner}} &= \frac{141,6452 \text{ kW}}{365,3315 \text{ kW}} \times 100\% \\ \eta_{\text{burner}} &= 0,3877 \times 100\% \\ \eta_{\text{burner}} &= 38,77\% \end{aligned}$$

#### 4.2.6 SFC burner

Untuk menghitung daya burner dapat dirumuskan sebagai berikut:

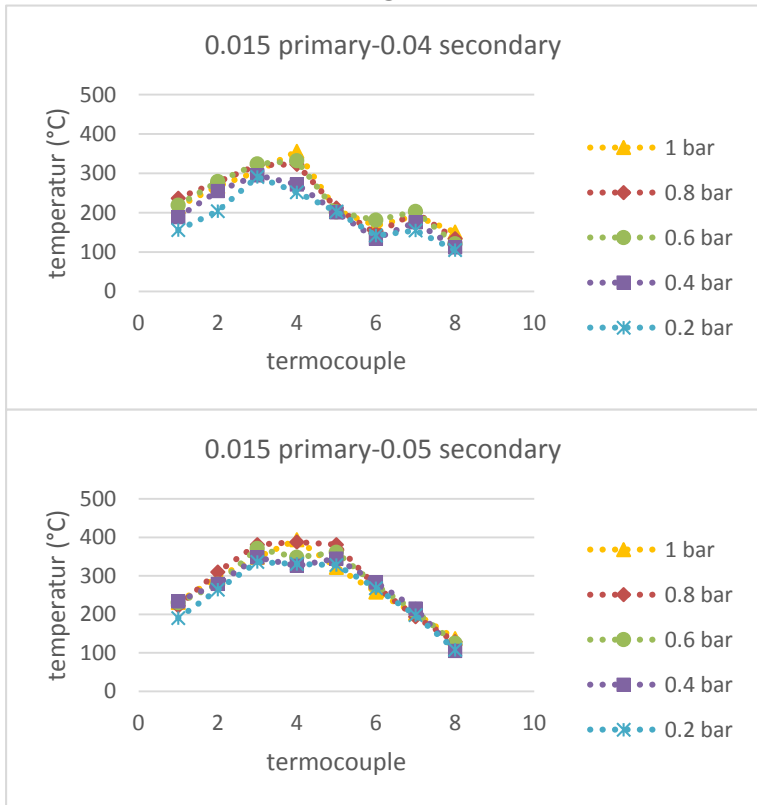
$$SFC = \frac{\dot{m}_{\text{syngas}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{\text{Daya Burner (kW)}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}$$

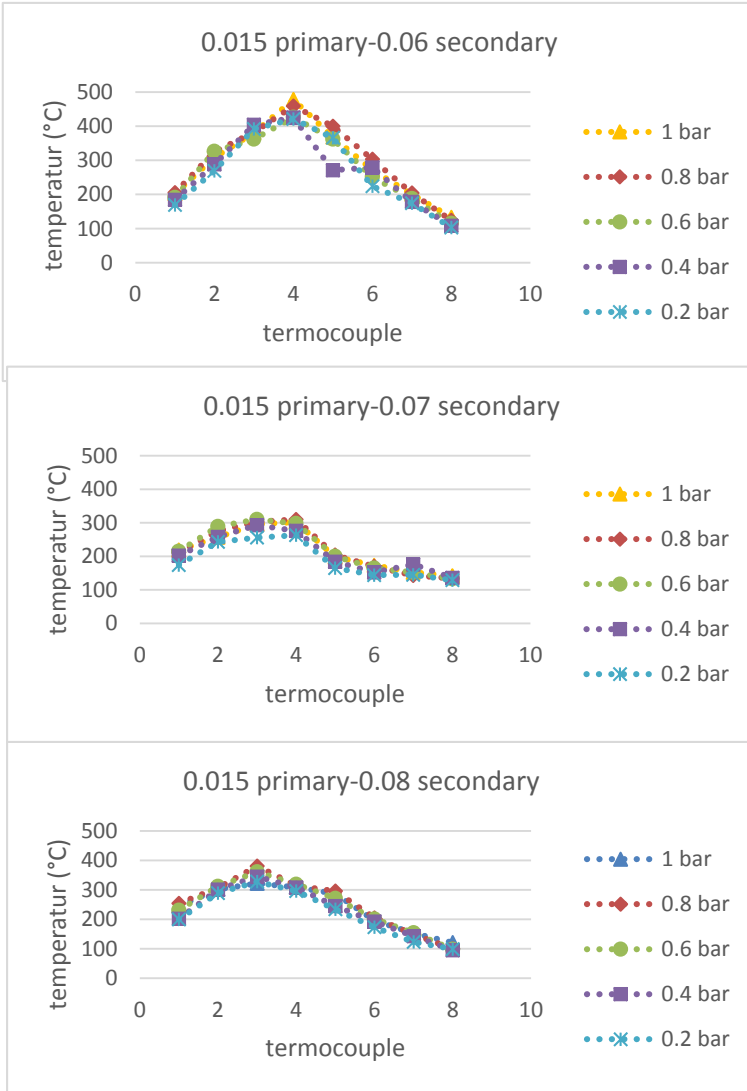
$$SFC = \frac{0,02805 \frac{kg}{s}}{141,6452 kW} \times \frac{3600 s}{1 h}$$

$$SFC = 1,0024 \frac{kg}{kW.h}$$

### 1.3 Analisa Grafik

#### 1.3.1 Grafik fungsi temperatur dan tekanan 0.015 kg/s *primary* dan 0.04-0,06 kg/s *secondary*





Gambar 4. 1 Grafik temperatur dan tekanan 0,015 kg/s *primary* dan 0,04-0,06 kg/s *secondary*

Gambar 4.1 menunjukkan grafik distribusi temperatur pada 8 titik pengukuran. Pengukuran diambil pada  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,04 - 0,08 \frac{kg}{s}$ . Pada grafik menunjukkan perbandingan temperatur pada 5 tekanan yang berbeda yaitu 0,2 bar sampai 1 bar dengan kenaikan 0,2 bar. Grafik menunjukkan pada tiap posisi tekanan memiliki *trendline* yang serupa.

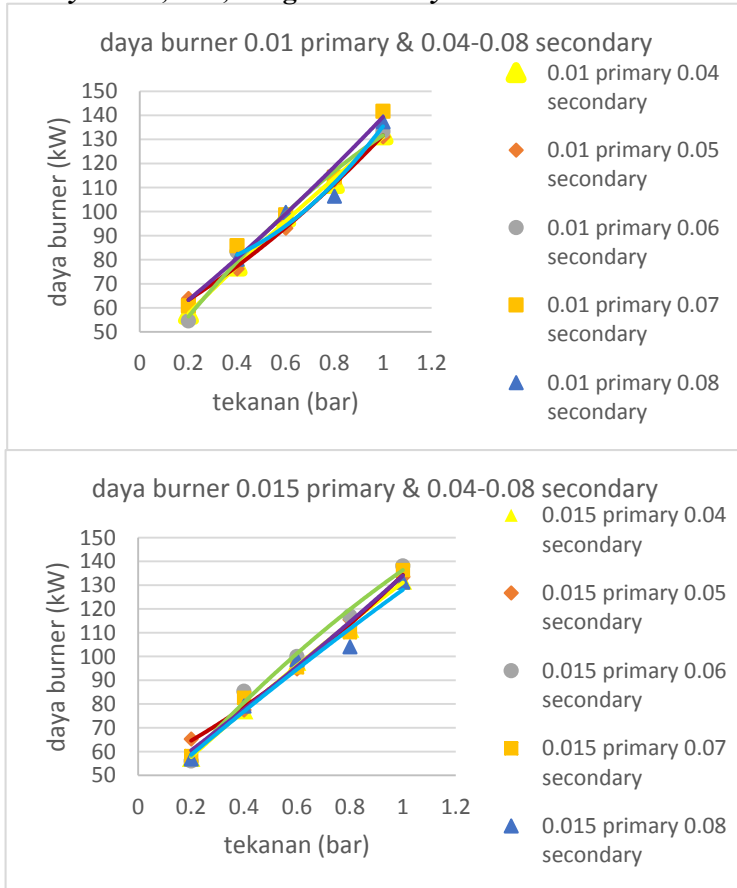
Temperatur tertinggi berada pada  $T = 478^\circ C$  dengan posisi perbandingan udara  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,06 \frac{kg}{s}$ , *termocouple* ke 4 dan pada tekanan 1 bar. sedangkan temperatur terendah terletak pada  $T = 95^\circ C$  dengan posisi perbandingan udara  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,08 \frac{kg}{s}$  *termocouple* ke 8 dan tekanan 0,2 bar. Hal ini terjadi karena kondisi *premixed flame*. *Premixed flame* akan terjadi apabila reaktan tercampur sempurna pada tingkat molekul sebelum terjadinya reaksi kimia yang signifikan, sehingga pada posisi zona tersebut memiliki temperatur yang lebih tinggi dibanding pada posisi yang lain. Sedangkan pada posisi *termocouple* ke 8 merupakan temperatur terendah. Selain itu, pada tekanan yang rendah akan menghasilkan kecepatan yang rendah sehingga temperatur yang dihasilkan menjadi rendah, sebaliknya jika tekanan yang diberikan tinggi, maka kecepatan akan tinggi sehingga menghasilkan temperatur yang tinggi.

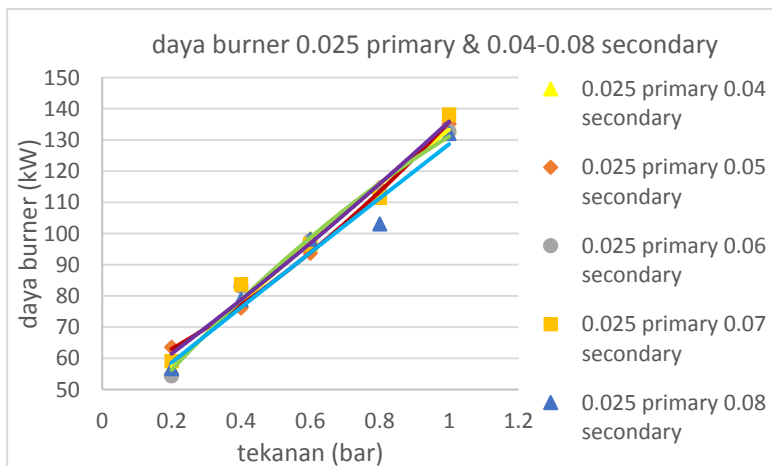
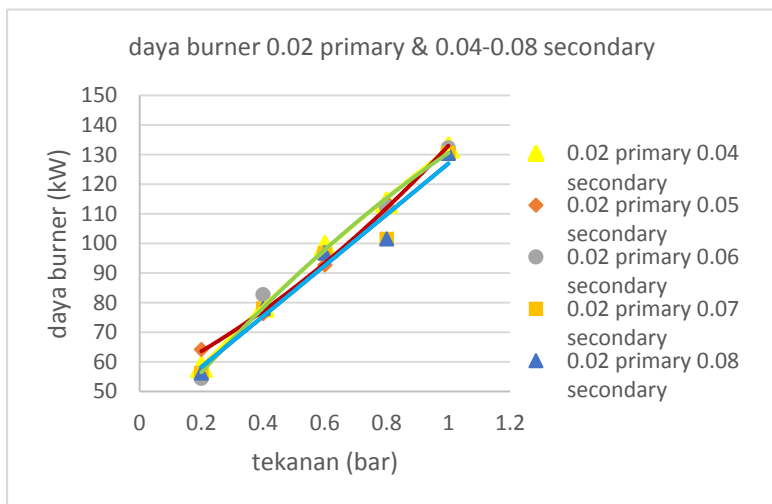
Pada grafik  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,04 - 0,08 \frac{kg}{s}$  rata-rata titik puncak tertinggi temperatur berada pada posisi *termocouple* ke 4 dan . Sedangkan titik terendah temperatur berada pada posisi *termocouple* ke 8. Fenomena perbedaan ini disebabkan karena perbedaan panjang

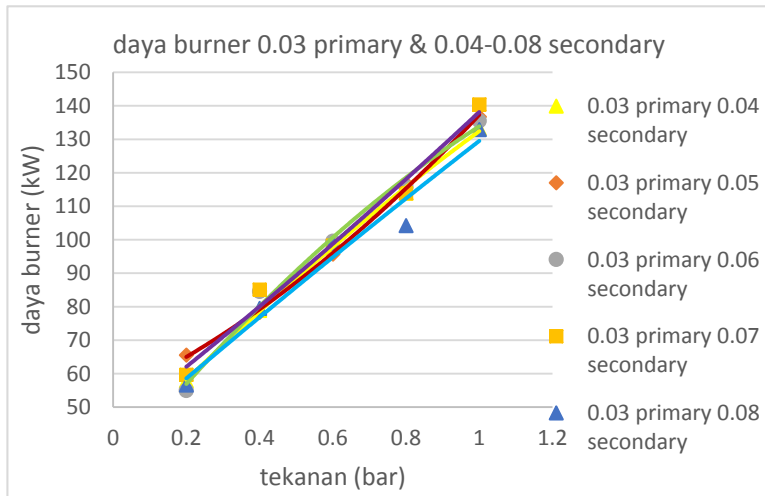


api. Hal ini kemungkinan disebabkan adanya gangguan dari luar seperti adanya gangguan angin.

#### 4.3.2 Grafik fungsi tekanan dan daya burner 0,015 kg/s primary dan 0,04-0,08 kg/s secondary







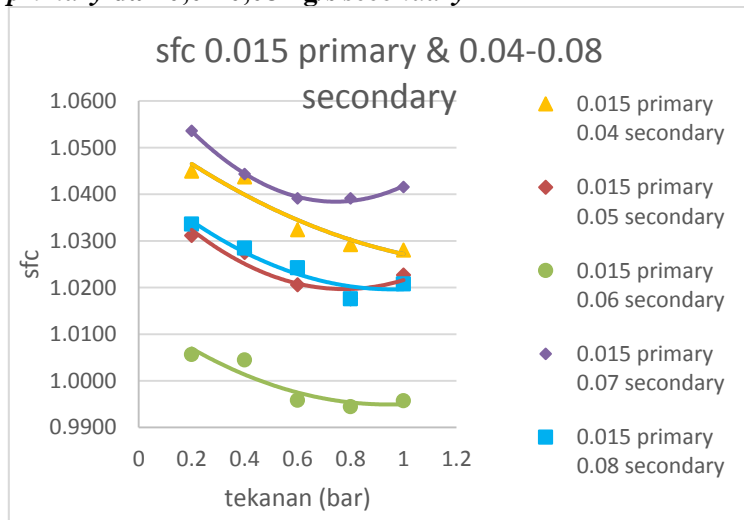
Gambar 4. 2 Grafik daya *burner* 0,015 kg/s *primary* dan 0,04-0,08 kg/s *secondary*

Pada gambar grafik diatas menunjukkan daya pembakaran *burner* terhadap perubahan tekanan syngas. Daya pembakaran yang didapatkan merupakan kemampuan *burner* dalam mendapatkan nilai pembakaran yang dihasilkan suatu *burner*. Dari grafik diatas dapat dilihat semakin tinggi tekanan berbanding lurus dengan peningkatan daya yang dihasilkan. Hampir semua Grafik diatas menunjukan pada tiap posisi tekanan memiliki *trendline* yang serupa.

Daya tertinggi terdapat pada posisi dengan tekanan syngas 1 bar pada perbandingan  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,07 \frac{kg}{s}$  yaitu sebesar 141,6452 kW. Sedangkan daya terendah terdapat pada posisi tekanan syngas 0,2 bar pada perbandingan  $\dot{m}_{primary} = 0,025 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,06 \frac{kg}{s}$

yaitu sebesar 54,3604 kW Sesuai dengan kenaikan tekanan laju aliran massa juga meningkat. Sehingga daya burner juga meningkat. Sedangkan untuk entalpi pembakaran merupakan fungsi temperatur, sehingga semakin meningkat temperatur daya pembakaran akan meningkat. Sehingga jika dihubungkan dengan distribusi temperatur sesuai dengan kenaikan temperatur maka daya *burner* juga meningkat.

#### 4.3.3 Grafik fungsi tekanan dan efisiensi *burner* 0,015 kg/s *primary* dan 0,04-0,08 kg/s *secondary*



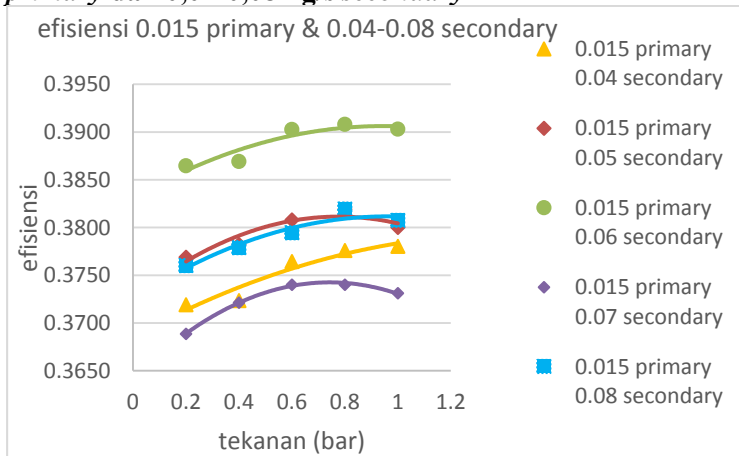
Gambar 4. 3 Grafik efisiensi *burner* 0,015 kg/s *primary* dan 0,04-0,08 kg/s *secondary*

Pada gambar grafik diatas adalah grafik efisiensi burner pada kenaikan tekanan. Grafik menunjukkan trendline efisiensi semakin menurun dengan perubahan tekanan yang semakin tinggi.

Efisiensi tertinggi terdapat pada posisi  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,06 \frac{kg}{s}$ , dan tekanan 0,2 bar yaitu sebesar 0,3930. Sedangkan efisiensi terendah terdapat pada posisi  $\dot{m}_{primary} = 0,025 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,05 \frac{kg}{s}$ , dan tekanan 1 bar yaitu sebesar 0,3669.

Efisiensi didapatkan dari perbandingan daya burner dan daya bahan bakar. Daya Bahan Bakar di dapatkan dari pengalihan laju aliran massa syngas dengan LHV gas. Laju aliran massa gas berbeda pada setiap kondisi. Hal ini dapat mempengaruhi unjuk kerja burner. LHV di dapatkan dari porperties dan komposisi gas yang terkandung.

#### 4.3.4 Grafik fungsi tekanan dan SFC burner 0,015 kg/s primary dan 0,04-0,08 kg/s secondary



Gambar 4. 4 Grafik SFC burner 0,015 kg/s primary dan 0,04-0,08 kg/s secondary

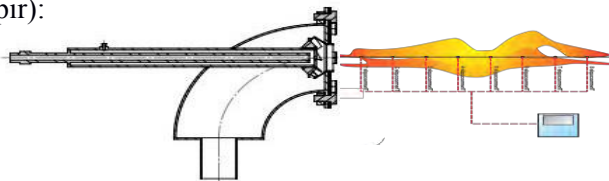
Pada gambar grafik diatas menunjukkan konsumsi bahan bakar spesifik burner terhadap perubahan tekanan . Konsumsi bahan bakar spesifik ini menunjukkan kemampuan bahan bakar menghasilkan daya (kW) dalam waktu satu jam. Dari grafik diatas dapat dilihat trendline grafik yang meningkat seiring peningkatan tekanan.

SFC tertinggi terdapat pada posisi posisi  $\dot{m}_{primary} = 0,025 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,05 \frac{kg}{s}$  , dan tekanan 0,2 bar yaitu sebesar 1,0592. Sedangkan SFC terendah terdapat pada posisi posisi  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{kg}{s}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,06 \frac{kg}{s}$  , dan tekanan 1 bar yaitu sebesar 0,9889.

Pada umumnya seluruh posisi perbandingan antara primary dan secondary mengalami peningkatan SFC. Pada grafik menunjukan jika pembakaran terjadi besar semakin meningkatnya daya pembakaran. Hal ini menunjukan bahwa konsumsi bahan bakar yang meningkat seiring dengan peningkatan tekanan. Semakin daya meningkat konsumsi bahan bakar juga meningkat dapat disimpulkan bahwa pembakaran ini terjadi dengan konsumsi bahan bakar yang tinggi.

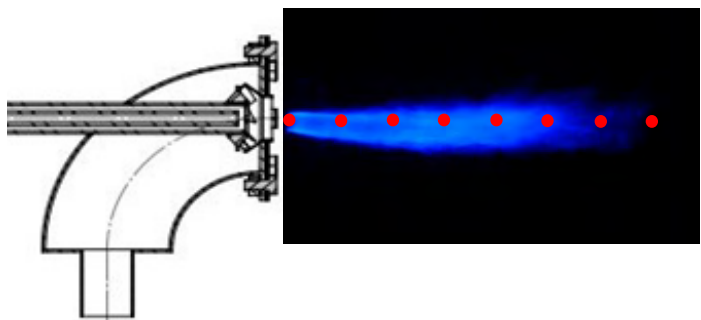
#### 1.4 Visualisasi Nyala Api

Visualisasi nyala api dari setiap perubahan perbandingan udara dengan tekanan bahan bakar berbeda-beda. Berikut adalah visualisasi nyala api ditinjau berdasarkan posisi dari setiap perubahan perbandingan udara dan tekanan bahan bakar 1 bar, untuk tekanan 0,8; 0,6; 0,4 dan 0,2 bar (Gambar terlampir):

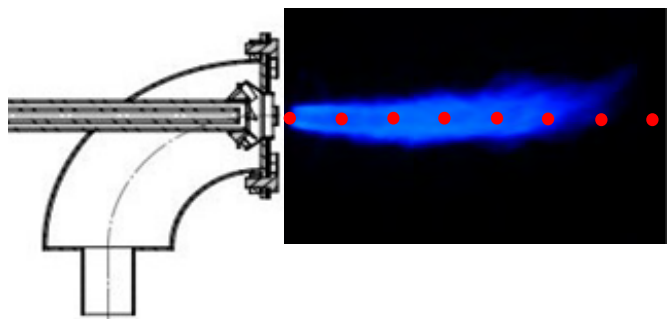


Gambar 4. 5 Pengukuran distribusi temperatur

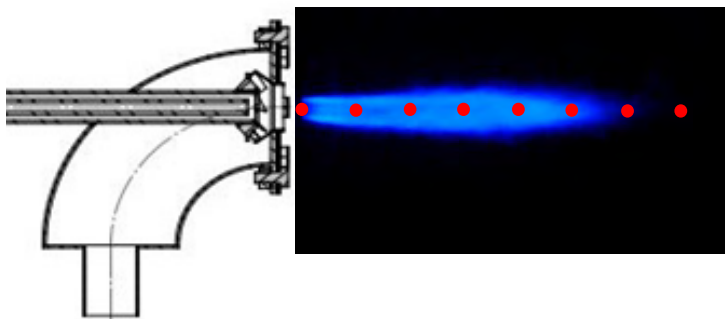
4.4.1 Visualisasi Nyala Api 0,01 kg/s *primary* dan 0,04-0,08 kg/s *secondary*



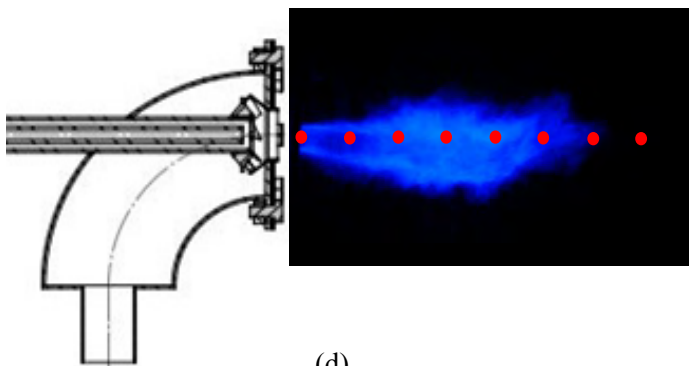
(a)



(b)

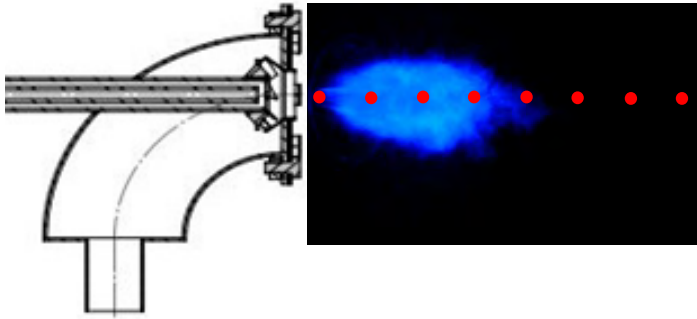


(c)



(d)



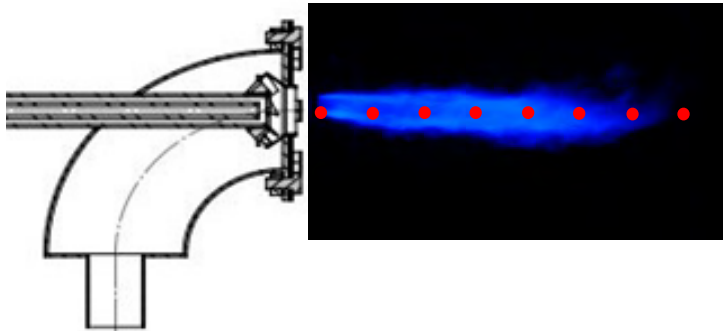


(e)

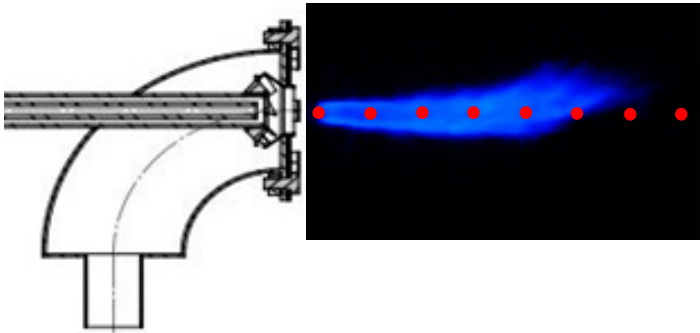
Gambar 4. 6 Visualisasi nyala api pada (a) 0,01 kg/s *primary* dan 0,04 kg/s *secondary* (b) 0,01 kg/s *primary* dan 0,05 kg/s *secondary* (c) 0,01 kg/s *primary* dan 0,06 kg/s *secondary* (d) 0,01 kg/s *primary* dan 0,07 kg/s *secondary* (e) 0,01 kg/s *primary* dan 0,08 kg/s *secondary*

Pada gambar diatas, terdapat 5 gambar visualisasi nyala api pada posisi 0,01 *primary* dan 0,04 sampai 0,08 *secondary*. Seiring dengan perubahan  $\dot{m}_{secondary}$  yang semakin kecil, bentuk api semakin pendek dan diameter api semakin lebar. Hal ini dikarenakan jumlah udara yang disalurkan melalui *burner* semakin kecil sehingga api yang dihasilkan semakin pendek. Pada perbandingan udara 0,01 *primary* dan 0,04 *secondary* api terlihat paling panjang diantara yang lain. Jika jumlah udara *secondary* diperbanyak maka lama kelamaan api akan mati. Hal ini disebabkan kecepatan rambat api yang lebih kecil di bandingkan dengan jumlah udara *primary* dan *syngas*. Warna api yang terlihat cenderung berwarna biru, hal ini dikarenakan pencampuran antara udara dan bahan bakar yang baik.

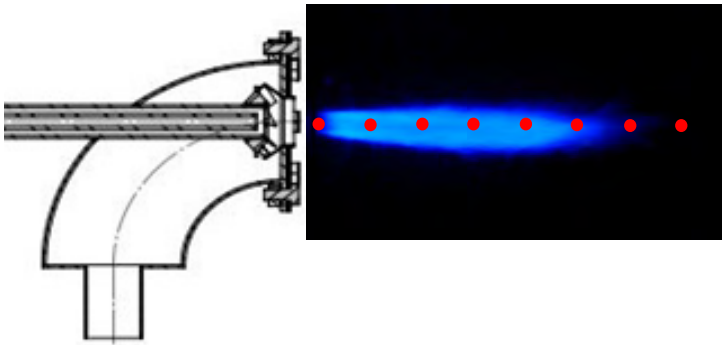
#### 4.4.2 Visualisasi Nyala Api 0,015 kg/s *primary* dan 0,04-0,08 kg/s *secondary*



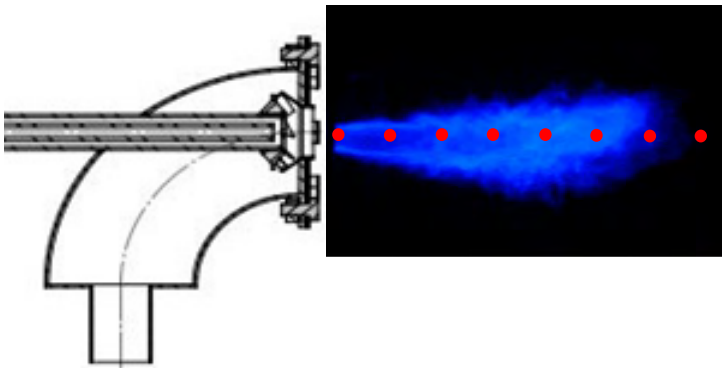
(a)



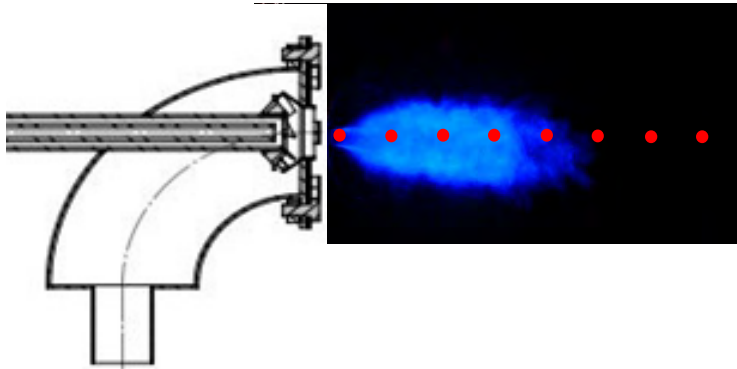
(b)



(c)



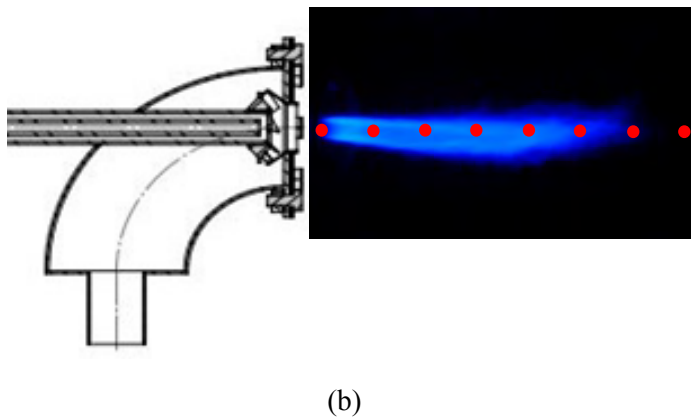
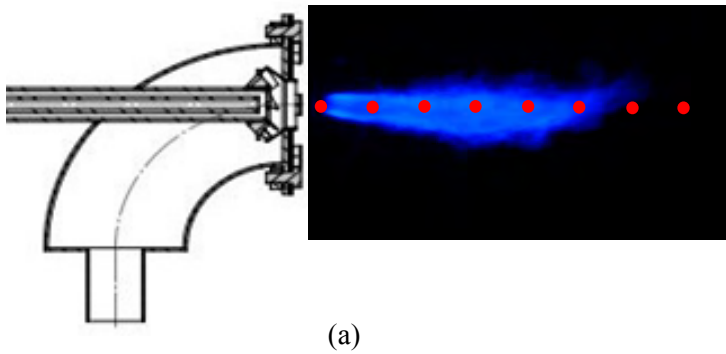
(d)

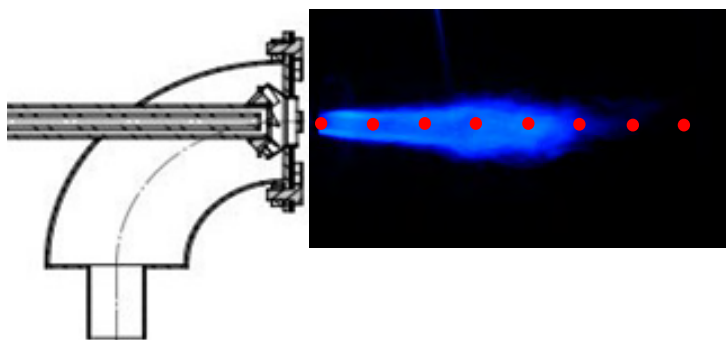


Gambar 4. 7 Visualisasi nyala api pada (a) 0,015 kg/s *primary* dan 0,04 kg/s *secondary* (b) 0,015 kg/s *primary* dan 0,05 kg/s *secondary* (c) 0,015 kg/s *primary* dan 0,06 kg/s *secondary* (d) 0,015 kg/s *primary* dan 0,07 kg/s *secondary* (e) 0,015 kg/s *primary* dan 0,08 kg/s *secondary*

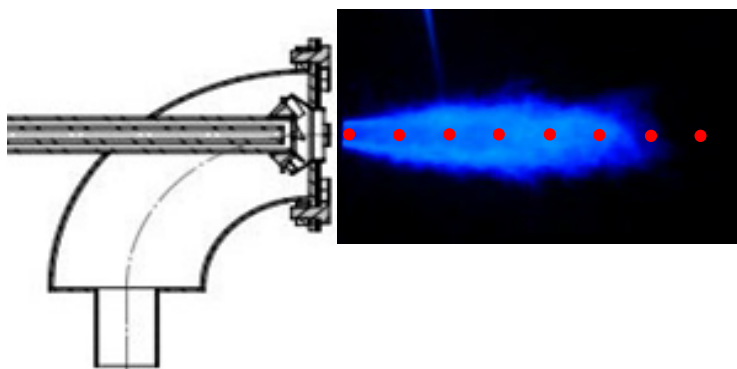
Pada gambar diatas, terdapat 5 gambar visualisasi nyala api pada posisi 0,015 *primary* dan 0,04 sampai 0,08 *secondary*. Seiring dengan perubahan  $\dot{m}_{secondary}$  yang semakin kecil, bentuk api semakin pendek dan diameter api semakin lebar. Hal ini dikarenakan jumlah udara yang disalurkan melalui *burner* semakin kecil sehingga api yang dihasilkan semakin pendek. Pada perbandingan udara 0,015 *primary* dan 0,04 *secondary* api terlihat paling panjang diantara yang lain. Jika jumlah udara *secondary* diperbanyak maka lama kelamaan api akan mati. Hal ini disebabkan kecepatan rambat api yang lebih kecil di bandingkan dengan jumlah udara *primary* dan *syngas*. Warna api yang terlihat cenderung berwarna biru, hal ini dikarenakan pencampuran antara udara dan bahan bakar yang baik.

4.4.3 Visualisasi Nyala Api 0,02 kg/s *primary* dan 0,04-0,08 kg/s *secondary*

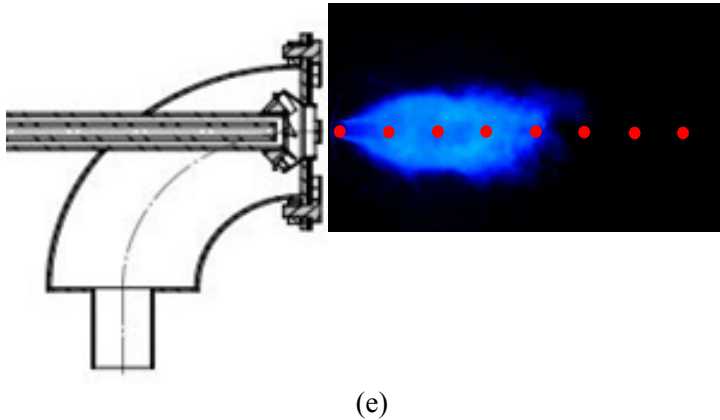




(c)



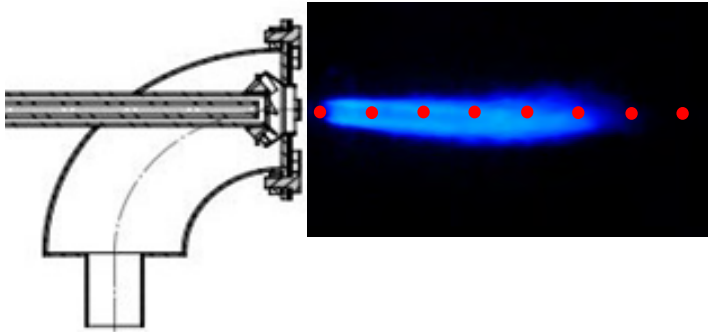
(d)



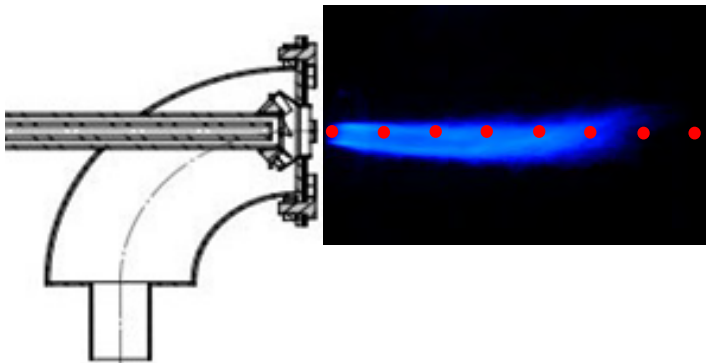
Gambar 4. 8 Visualisasi nyala api pada (a) 0,02 kg/s *primary* dan 0,04 kg/s *secondary* (b) 0,02 kg/s *primary* dan 0,05 kg/s *secondary* (c) 0,02 kg/s *primary* dan 0,06 kg/s *secondary* (d) 0,02 kg/s *primary* dan 0,07 kg/s *secondary* (e) 0,02 kg/s *primary* dan 0,08 kg/s *secondary*

Pada gambar diatas, terdapat 5 gambar visualisasi nyala api pada posisi 0,02 *primary* dan 0,04 sampai 0,08 *secondary*. Seiring dengan perubahan  $\dot{m}_{secondary}$  yang semakin kecil, bentuk api semakin pendek dan diameter api semakin lebar. Hal ini dikarenakan jumlah udara yang disalurkan melalui *burner* semakin kecil sehingga api yang dihasilkan semakin pendek. Pada perbandingan udara 0,02 *primary* dan 0,04 *secondary* api terlihat paling panjang diantara yang lain. Jika jumlah udara *secondary* diperbanyak maka lama kelamaan api akan mati. Hal ini disebabkan kecepatan rambat api yang lebih kecil di bandingkan dengan jumlah udara *primary* dan *syngas*. Warna api yang terlihat cenderung berwarna biru, hal ini dikarenakan pencampuran antara udara dan bahan bakar yang baik.

#### 4.4.4 Visualisasi Nyala Api 0,025 kg/s *primary* dan 0,04-0,08 kg/s *secondary*

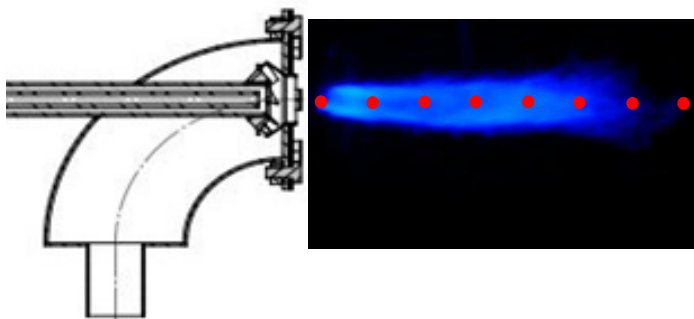


(a)

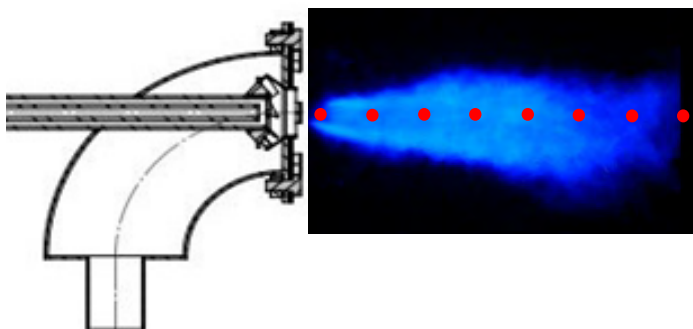


(b)

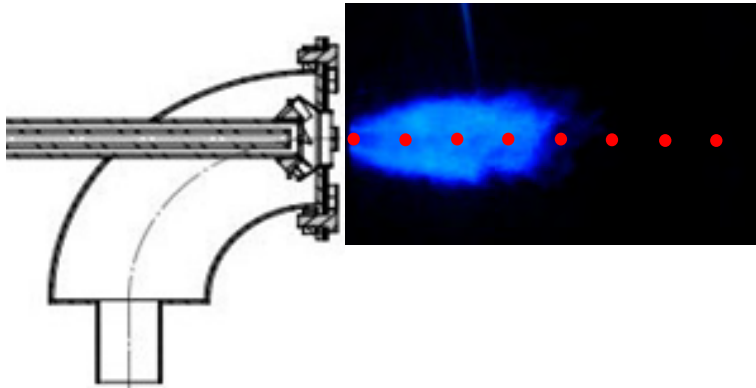




(c)



(d)

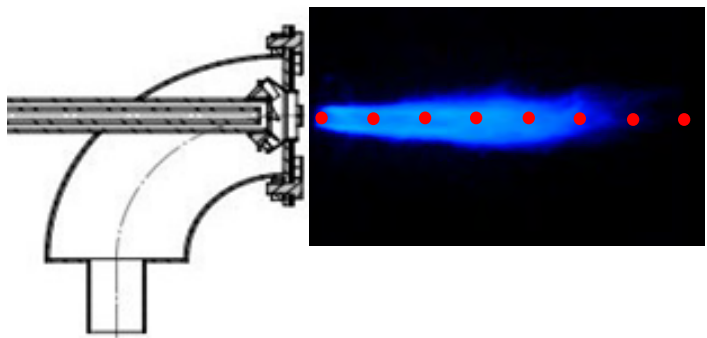


(e)

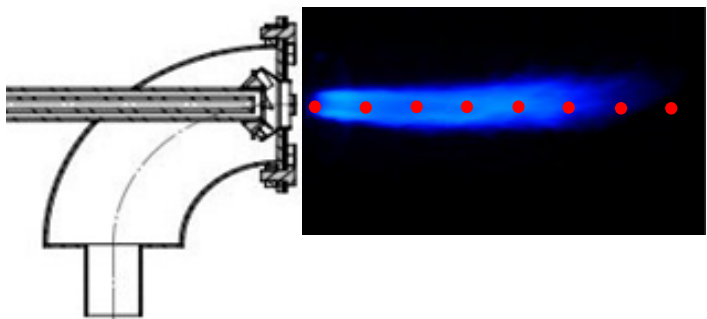
Gambar 4. 9 Visualisasi nyala api pada (a) 0,025 kg/s *primary* dan 0,04 kg/s *secondary* (b) 0,025 kg/s *primary* dan 0,05 kg/s *secondary* (c) 0,025 kg/s *primary* dan 0,06 kg/s *secondary* (d) 0,025 kg/s *primary* dan 0,07 kg/s *secondary* (e) 0,025 kg/s *primary* dan 0,08 *secondary*

Pada gambar diatas, terdapat 5 gambar visualisasi nyala api pada posisi 0,025 *primary* dan 0,04 sampai 0,08 *secondary*. Seiring dengan perubahan  $\dot{m}_{secondary}$  yang semakin kecil, bentuk api semakin pendek dan diameter api semakin lebar. Hal ini dikarenakan jumlah udara yang disalurkan melalui *burner* semakin kecil sehingga api yang dihasilkan semakin pendek. Pada perbandingan udara 0,025 *primary* dan 0,04 *secondary* api terlihat paling panjang diantara yang lain. Jika jumlah udara *secondary* diperbanyak maka lama kelamaan api akan mati. Hal ini disebabkan kecepatan rambat api yang lebih kecil di bandingkan dengan jumlah udara *primary* dan *syngas*. Warna api yang terlihat cenderung berwarna biru, hal ini dikarenakan pencampuran antara udara dan bahan bakar yang baik.

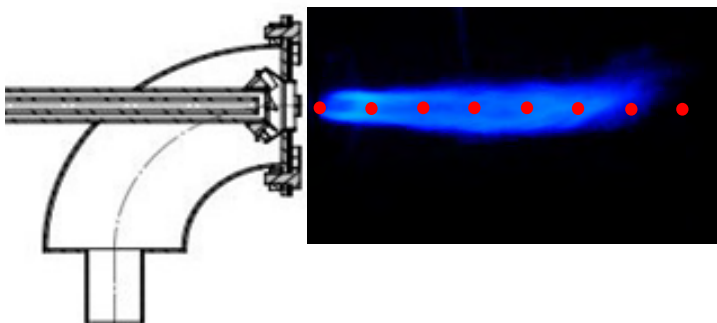
4.4.5 Visualisasi Nyala Api 0,03 kg/s *primary* dan 0,04-0,08 kg/s *secondary*



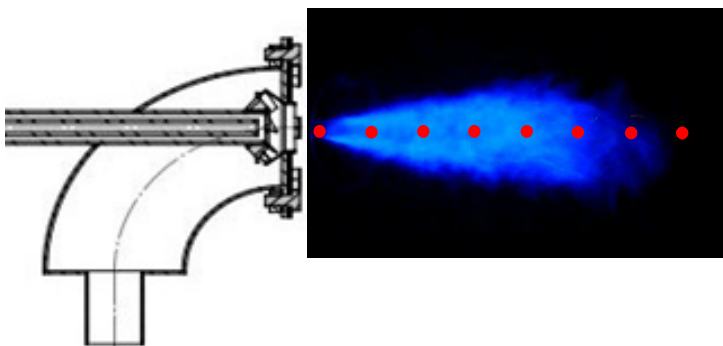
(a)



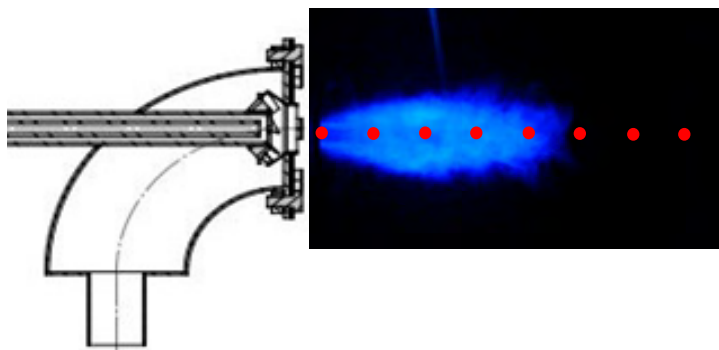
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4. 10 Visualisasi nyala api pada (a) 0,03 kg/s *primary* dan 0,04 kg/s *secondary* (b) 0,03 kg/s *primary* dan 0,05 kg/s *secondary* (c) 0,03 kg/s *primary* dan 0,06 kg/s *secondary* (d) 0,03 kg/s *primary* dan 0,07 kg/s *secondary* (e) 0,03 kg/s *primary* dan 0,08 kg/s *secondary*

Pada gambar diatas, terdapat 5 gambar visualisasi nyala api pada posisi 0,03 *primary* dan 0,04 sampai 0,08 *secondary*. Seiring dengan perubahan  $\dot{m}_{secondary}$  yang semakin kecil, bentuk api semakin pendek dan diameter api semakin lebar. Hal ini dikarenakan jumlah udara yang disalurkan melalui *burner* semakin kecil sehingga api yang dihasilkan semakin pendek. Pada perbandingan udara 0,03 *primary* dan 0,04 *secondary* api terlihat paling panjang diantara yang lain. Jika jumlah udara *secondary* diperbanyak maka lama kelamaan api akan mati. Hal ini disebabkan kecepatan rambat api yang lebih kecil di bandingkan dengan jumlah udara *primary* dan *syngas*. Warna api yang terlihat cenderung berwarna biru, hal ini dikarenakan pencampuran antara udara dan bahan bakar yang baik.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Temperatur tertinggi yang dihasilkan pada *burner syngas* adalah  $478^{\circ}\text{C}$  dengan perbandingan udara  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,06 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  pada tekanan 1 bar.
2. Daya *burner* mengalami peningkatan berbanding lurus dengan peningkatan tekanan. Daya burner tertinggi terdapat pada posisi dengan tekanan syngas 1 bar pada perbandingan udara  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,07 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  sebesar 141,6452 kW.
3. SFC tertinggi terdapat pada posisi perbandingan udara  $\dot{m}_{primary} = 0,025 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,05 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ , dan tekanan 1 bar yaitu sebesar  $1,0592 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}}$ .
4. Efisiensi *burner* tertinggi terdapat pada posisi perbandingan udara  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,06 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  dan tekanan 0,2 bar, yaitu sebesar 0,3930 atau 39,30%.
5. Variasi untuk unjuk kerja burner gas *type partially premixed* terbaik adalah dengan perbandingan udara  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,07 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  atau 17,6%.
6. Visualisasi api terbaik yang dihasilkan pada penelitian ini adalah pada posisi perbandingan udara  $\dot{m}_{primary} = 0,015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  dan  $\dot{m}_{secondary} = 0,06 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  pada tekanan 1 bar. Seiring dengan perubahan  $\dot{m}_{secondary}$  yang semakin kecil, bentuk api semakin pendek dan diameter api semakin

lebar. Hal ini dikarenakan jumlah udara yang disalurkan melalui burner semakin kecil sehingga api yang dihasilkan semakin pendek. Warna api yang terlihat cenderung berwarna biru, hal ini dikarenakan pencampuran antara udara dan bahan bakar yang baik.

## **5.2 Saran**

1. Untuk penelitian selanjutnya, diharapkan dapat mendesign ulang rancangan *burner* agar mendapatkan unjuk kerja yang lebih baik.
2. Diberikan alat pengukur mistar pada termokopel agar jarak setiap titik termokopel lebih seragam dan visualisasi yang dihasilkan lebih jelas.
3. Mengkalibrasi ulang terhadap alat yang dipakai, agar hasil pengukuran lebih presisi dan akurat.
4. Melakukan pengukuran terhadap gas buang hasil pembakaran agar mendapatkan komposisi produk hasil pembakaran yang lebih akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik. 2000
- [2] A. Ningsih. 2004. Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap kualitas karbon aktif serbuk gergaji kayu sembarang yang dimanfaatkan sebagai penjernihan air sumur ds. Sumber karya kec. Binjai Timur kota Binjai. Program Studi Fisika Universitas Sumatera Utara.
- [3] Susanto, Herri. 2012. Sekilas Teknologi Gasifikasi. Progam Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung.
- [4] Karbon aktif, “Proses Pembuatan Karbon Aktif”, diakses di [https://id.wikipedia.org/wiki/karbon\\_aktif](https://id.wikipedia.org/wiki/karbon_aktif), tanggal 31 Oktober 2015.
- [5] Malik, Usman. 2013. Alternatif Pemanfaatan Limbah Industri Pengolahan Kayu sebagai arang briket. Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Riau.
- [6] Baukal, C. E. 2003. Industrial Burners Handbook. CRC Press.
- [7] Pratama, Ryan. Diktat Furnace.
- [8] Sjstrom, Eero. 1995. Kimia Kayu: Dasar-dasar Penggunaan. Gadjah Mada University Press.
- [9] Casey, J. P. 1980. Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. John Wiley and Sons, New York.
- [10] Bahan Bakar, diakses di [https://id.wikipedia.org/wiki/Bahan\\_bakar](https://id.wikipedia.org/wiki/Bahan_bakar) , tanggal 30 Oktober 2015
- [11] Energi Biomassa, “Energi dan Listrik Pertanian” diakses di <http://web.ipb.ac.id/~tepfeta/elearning/media/Energi%20dan%20Listrik%20Pertanian/MATERI%20WEB%20ELP/Bab%20III%20BIOMASSA/indexBIOMASSA.htm> tanggal 1 November 2015.



- [12] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro. 2008. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. Wiley.
- [13] Pandima, Mahatma. 2014. Studi Eksperimen Rancangan *Burner Type Partially Premixed* Dengan Bahan Bakar *Syngas* Biomassa Serbuk Kayu Dengan Variasi Dimensi *Mixed Chamber*. Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [14] Lieberman, N.P., *A Working Guide to Process Equipment*, 3rd edition, McGrawHill, 2008
- [15] Adi Surjosatyo. 2010. Pembakaran Gas Hasil Gasifikasi Biomassa Di *Premixed Gas Burner* Dengan Metode 3D *Computational Fluid Dynamics*, Teknik Mesin Universitas Indonesia, Jakarta.
- [16] Liu, Yong. 2011. The influence of air distribution on the single-phase flow field of central fuel rich swirl burner, School of Energy Science and Engineering Harbin Institute of Technology, Harbin P. R. China.
- [17] Waldheim, Lars and T. Nilsson, *Heating Value Of Gases From Biomass Gasification*, TPS Termiska Processer AB, 2001.

## Lampiran I: Tabel Perhitungan AFR, Efisiensi, SFC, dan Daya Burner

Diameter nozzle	rh primary	rh secundar	tekanan (bar)	rh syngas (L/min)	rh syngas (kg/s)	temperatur (Celcius)										temperatur		
						1	2	3	4	5	6	7	8			min	max	mean
10 mm		0,04	1	2,21	0,03757		265	303	354	204	165	190	149	149	354	233		
			0,8	1,89	0,03213	235	276	319	321	210	145	199	132	132	321	230		
			0,6	1,65	0,02805	217	277	322	330	200	179	201	119	119	330	231		
			0,4	1,32	0,02244	187	253	293	270	199	132	174	110	110	293	202		
			0,2	0,98	0,01666	154	202	289	250	201	140	153	103	103	289	187		
			1	2,23	0,03791	219	257	296	302	198	173	152	142	142	302	217		
			0,8	1,92	0,03264	211	276	303	310	204	170	143	134	134	310	219		
			0,6	1,58	0,02686	215	289	310	298	200	165	152	133	133	310	220		
			0,4	1,3	0,0221	202	258	293	276	184	152	176	136	136	293	210		
			0,2	1,1	0,0187	174	243	256	263	165	144	145	129	129	263	190		
			1	2,23	0,03791	212	290	343	359	317	253	197	132	132	359	263		
			0,8	1,9	0,0323	197	296	376	347	376	267	189	124	124	376	272		
		0,06	0,6	1,64	0,02788	201	287	366	343	356	270	203	120	120	366	268		
			0,4	1,4	0,0238	187	274	343	321	340	278	210	100	100	343	257		
			0,2	0,92	0,01564	185	253	331	301	323	263	193	103	103	331	244		
			1	2,32	0,03944	197	303	376	432	363	267	195	128	128	432	283		
			0,8	1,87	0,03179	200	320	377	433	395	298	199	119	119	433	293		
			0,6	1,62	0,02754	186	321	357	421	357	246	183	110	110	421	273		
			0,4	1,41	0,02397	179	283	399	420	266	274	173	103	103	420	262		
			0,2	1	0,017	164	264	387	416	351	219	169	98	98	416	260		
			1	2,22	0,03774	197	287	390	353	287	190	153	119	119	390	247		
			0,8	1,73	0,02941	207	298	403	363	288	209	142	106	106	403	252		
			0,6	1,65	0,02805	157	284	396	365	284	201	150	103	103	396	243		
			0,4	1,33	0,02261	142	271	389	351	243	198	143	109	109	389	231		
			0,2	0,96	0,01632	139	251	378	342	213	188	101	102	101	378	214		

afR	Φ	lhv	energi bahan bakar (kW)	efisiensi	sfc (kg/kWh)	h° RP (entalpi Pembakaran) KJ/kg	Qloss	DAYA BURNER (kW)
1,33	73,45	9262,9681	348,0097	0,3789	1,0257	5753,259022	216,1499415	131,8598
1,56	62,82	9262,9681	297,6192	0,3790	1,0254	5752,237328	184,8193854	112,7998
1,78	54,84	9262,9681	259,8263	0,3762	1,0330	5777,990327	162,0726287	97,7536
2,23	43,87	9262,9681	207,8610	0,3721	1,0443	5815,823785	130,5070857	77,3539
3,00	32,57	9262,9681	154,3200	0,3717	1,0456	5819,884561	96,9592769	57,3618
1,32	74,12	9262,9681	351,1591	0,3731	1,0416	5806,662601	220,1305792	131,0285
1,53	63,81	9262,9681	302,3433	0,3740	1,0391	5798,498004	189,2629749	113,0803
1,86	52,51	9262,9681	248,8033	0,3740	1,0391	5798,498004	155,7467654	93,0557
2,26	43,21	9262,9681	204,7116	0,3721	1,0443	5815,823785	128,5297057	76,1819
2,67	36,56	9262,9681	173,2175	0,3689	1,0536	5846,165593	109,3232966	63,8942
1,58	61,76	9262,9681	351,1591	0,3795	1,0242	5748,083916	217,9098613	133,2493
1,86	52,62	9262,9681	299,1939	0,3814	1,0191	5730,413496	185,0923559	114,1015
2,15	45,42	9262,9681	258,2516	0,3802	1,0221	5740,799974	160,0535033	98,1980
2,52	38,78	9262,9681	220,4586	0,3777	1,0291	5764,607978	137,1976699	83,2610
3,84	25,48	9262,9681	144,8728	0,3763	1,0327	5776,963295	90,35170593	54,5211
1,77	55,08	9262,9681	365,3315	0,3877	1,0024	5671,558088	223,686251	141,6452
2,20	44,39	9262,9681	294,4698	0,3878	1,0021	5670,496611	180,2650873	114,2047
2,54	38,46	9262,9681	255,1021	0,3865	1,0057	5683,197734	156,5152656	98,5869
2,92	33,47	9262,9681	222,0333	0,3863	1,0059	5684,253255	136,2515505	85,7818
4,12	23,74	9262,9681	157,4705	0,3859	1,0071	5688,470884	96,70400503	60,7665
2,12	46,12	9262,9681	349,5844	0,3895	0,9978	5654,860968	213,4144529	136,1700
2,72	35,94	9262,9681	272,4239	0,3904	0,9954	5646,452588	166,0621706	106,3617
2,85	34,27	9262,9681	259,8263	0,3901	0,9963	5649,489489	158,4681802	101,3581
3,54	27,63	9262,9681	209,4357	0,3828	1,0152	5716,811372	129,2571051	80,1786
4,90	19,94	9262,9681	151,1716	0,3816	1,0185	5728,32795	93,48631215	57,6853

Diameter nozzle	m primary	m sekunder	tekanan (bar)	m syngas (L/min)	m syngas (kg/s)	temperatur (Celcius)								temperatur		
						1	2	3	4	5	6	7	8	min	max	mean
10 mm	0,015	0,04	1	2,23	0,03757	216	267	305	356	206	167	192	151	151	356	233
			0,8	1,89	0,03213	237	278	321	323	212	147	201	134	134	323	232
			0,6	1,65	0,02805	219	279	324	332	202	181	203	121	121	332	233
			0,4	1,32	0,02244	189	255	295	272	201	134	176	112	112	295	204
			0,2	0,98	0,01666	156	204	291	252	203	142	155	105	105	291	189
			1	2,23	0,03791	217	295	348	364	322	258	202	137	137	364	268
		0,05	0,8	1,92	0,03264	202	301	381	352	381	272	194	129	129	381	277
			0,6	1,58	0,02686	206	292	371	348	361	275	208	125	125	371	273
			0,4	1,3	0,0221	192	279	348	326	345	283	215	105	105	348	262
			0,2	1,1	0,0187	190	258	336	306	328	268	198	108	108	336	249
			1	2,23	0,03791	202	308	381	478	368	272	200	133	133	478	293
			0,8	1,9	0,0323	205	325	382	459	400	303	204	124	124	459	300
		0,06	0,6	1,64	0,02788	191	326	362	426	362	251	188	115	115	426	278
			0,4	1,4	0,0238	184	288	404	425	271	279	178	108	108	425	267
			0,2	0,92	0,01564	169	269	392	421	366	224	174	103	103	421	265
			1	2,32	0,03944	219	257	296	302	198	173	152	142	142	302	217
			0,8	1,87	0,03179	211	276	303	310	204	170	143	134	134	310	219
			0,6	1,62	0,02754	215	289	310	298	200	165	152	133	133	310	220
		0,07	0,4	1,41	0,02397	202	258	293	276	184	152	176	136	136	293	210
			0,2	1	0,017	174	243	256	263	165	144	145	129	129	263	190
			1	2,22	0,03774	245	302	322	309	287	196	153	121	121	322	242
			0,8	1,73	0,02941	254	307	381	314	296	205	149	100	100	381	251
			0,6	1,65	0,02805	231	312	361	319	271	201	154	98	98	361	243
			0,4	1,33	0,02261	202	301	345	308	245	192	143	95	95	345	229
		0,08	0,2	0,96	0,01632	200	289	328	296	234	173	123	99	99	328	218

afr	Φ	lhv	energi bahan bakar (kW)	efisiensi	sfc (kg/kWh)	h° RP (entalpi Pembakaran) KJ/Kg	Qloss	DAYA BURNER (kW)
1,46	66,77	9262,9681	348,0097	0,3780	1,0281	5761,197015	216,4481718	131,5615
1,71	57,11	9262,9681	297,6192	0,3776	1,0292	5765,181799	185,2352912	112,3839
1,96	49,85	9262,9681	259,8263	0,3764	1,0324	5775,936381	162,0150155	97,8112
2,45	39,88	9262,9681	207,8610	0,3724	1,0437	5813,794038	130,4615382	77,3995
3,30	29,61	9262,9681	154,3210	0,3719	1,0450	5817,85396	96,92544698	57,3956
1,32	74,12	9262,9681	351,1591	0,3800	1,0227	5742,880452	217,7125979	133,4465
1,53	63,81	9262,9681	302,3433	0,3819	1,0176	5725,185603	186,8700581	115,4732
1,86	52,51	9262,9681	248,8033	0,3808	1,0206	5735,604633	154,0583404	94,7450
2,26	43,21	9262,9681	204,7116	0,3782	1,0275	5759,448066	127,2838023	77,4278
2,67	36,56	9262,9681	173,2175	0,3769	1,0312	5771,829916	107,9332194	65,2843
1,58	61,76	9262,9681	351,1591	0,3903	0,9957	5647,540757	214,0982701	137,0609
1,86	52,62	9262,9681	299,1939	0,3908	0,9944	5642,853474	182,2641672	116,9297
2,15	45,42	9262,9681	258,2516	0,3903	0,9958	5647,922397	157,4640764	100,7875
2,52	38,78	9262,9681	220,4586	0,3869	1,0045	5678,97716	135,1596564	85,2990
3,84	25,48	9262,9681	144,8728	0,3865	1,0057	5683,197734	88,88521255	55,9876
1,77	55,08	9262,9681	365,3315	0,3731	1,0416	5806,662601	229,014773	136,3167
2,20	44,39	9262,9681	294,4698	0,3740	1,0391	5798,498004	184,3342516	110,1355
2,54	38,46	9262,9681	255,1021	0,3740	1,0391	5798,498004	159,690635	95,4115
2,92	33,47	9262,9681	222,0333	0,3721	1,0443	5815,823785	139,4052961	82,6280
4,12	23,74	9262,9681	157,4705	0,3689	1,0536	5846,165593	99,38481509	58,0856
2,12	46,12	9262,9681	349,5844	0,3807	1,0208	5736,209506	216,4845467	133,0999
2,72	35,94	9262,9681	272,4239	0,3819	1,0176	5725,185603	168,3777086	104,0629
2,85	34,27	9262,9681	259,8263	0,3795	1,0242	5748,127571	161,2349784	98,5913
3,54	27,63	9262,9681	209,4357	0,3779	1,0284	5762,543748	130,2911141	79,1446
4,90	19,94	9262,9681	151,1716	0,3760	1,0336	5780,044746	94,33033026	56,8413

Diameter nozzle	rh primary	rh secondar	tekanan (bar)	rh syngas (L/min)	rh syngas (kg/s)	temperatur (Celcius)								temperatur		
						1	2	3	4	5	6	7	8	min	max	mean
10 mm	0,02	0,04	1	2,21	0,03757	220	298	351	367	325	261	205	140	140	367	271
			0,8	1,89	0,03213	205	304	384	355	384	275	197	132	132	384	280
			0,6	1,65	0,02805	209	295	374	351	364	278	211	128	128	374	276
			0,4	1,32	0,02244	195	282	351	329	348	286	218	108	108	351	265
			0,2	0,98	0,01666	193	261	339	309	331	271	201	111	111	339	252
			1	2,23	0,03791	276	301	332	289	243	203	167	132	132	332	243
		0,05	0,8	1,92	0,03264	287	298	330	278	267	190	156	143	143	330	244
			0,6	1,58	0,02686	267	287	298	287	253	198	154	125	125	298	234
			0,4	1,3	0,0221	289	267	297	298	250	178	134	123	123	298	230
			0,2	1,1	0,0187	243	277	276	265	249	167	132	110	110	277	215
		0,06	1	2,23	0,03791	289	333	321	290	275	197	145	123	123	333	247
			0,8	1,9	0,0323	288	321	322	286	276	187	123	118	118	322	240
			0,6	1,64	0,02788	278	320	318	281	267	173	119	121	119	320	235
			0,4	1,4	0,0238	280	319	313	273	256	165	120	119	119	319	231
			0,2	0,92	0,01564	284	323	301	269	245	154	122	113	113	323	226
		0,07	1	2,32	0,03944	287	331	319	288	273	195	143	121	121	331	245
			0,8	1,87	0,03179	286	319	320	284	274	185	121	116	116	320	238
			0,6	1,62	0,02754	276	318	316	279	265	171	117	119	117	318	233
			0,4	1,41	0,02397	278	317	311	271	254	163	118	117	117	317	229
			0,2	1	0,017	282	321	299	267	243	152	120	111	111	321	224
		0,08	1	2,22	0,03774	276	301	297	276	256	197	134	114	114	301	231
			0,8	1,73	0,02941	276	298	297	275	259	187	124	102	102	298	227
			0,6	1,65	0,02805	273	294	293	273	243	188	122	101	101	294	223
			0,4	1,33	0,02261	276	297	290	271	231	192	120	100	100	297	222
			0,2	0,96	0,01632	265	275	292	275	222	167	115	102	102	292	214

afr	Φ	lhv	energi bahan bakar (kW)	efisiensi	sfc (kg/kWh)	h° RP (entalpi Pembakaran) KJ/kg	Q loss	DAYA BURNER (kW)
1,60	61,21	9262,9681	348,0097	0,3804	1,0218	5739,75993	215,6427806	132,3669
1,87	52,35	9262,9681	297,6192	0,3823	1,0167	5722,044482	183,8492892	113,7699
2,14	45,70	9262,9681	259,8263	0,3811	1,0197	5732,48955	160,7963319	99,0299
2,67	36,56	9262,9681	207,8610	0,3786	1,0266	5756,35298	129,1725609	78,6884
3,60	27,14	9262,9681	154,3210	0,3772	1,0303	5768,737907	96,10717353	58,2139
1,32	74,12	9262,9681	351,1591	0,3764	1,0324	5775,936381	218,9657482	132,1994
1,53	63,81	9262,9681	302,3433	0,3762	1,0330	5777,990327	188,5936043	113,7497
1,86	52,51	9262,9681	248,8033	0,3727	1,0428	5810,74408	156,076586	92,7267
2,26	43,21	9262,9681	204,7116	0,3727	1,0428	5810,74408	128,4174442	76,2942
2,67	36,56	9262,9681	173,2175	0,3704	1,0493	5832,057635	109,0594778	64,1580
1,58	61,76	9262,9681	351,1591	0,3766	1,0321	5774,909586	218,9268224	132,2323
1,86	52,62	9262,9681	299,1939	0,3765	1,0322	5775,209506	186,539267	112,6546
2,15	45,42	9262,9681	258,2516	0,3751	1,0361	5788,265266	161,3768356	96,8747
2,52	38,78	9262,9681	220,4586	0,3750	1,0364	5789,293319	137,785181	82,6735
3,84	25,48	9262,9681	144,8728	0,3739	1,0393	5799,181799	90,69920333	54,1736
1,77	55,08	9262,9681	365,3315	0,3763	1,0327	5776,963295	227,8434324	137,4880
2,20	44,39	9262,9681	294,4698	0,3765	1,0322	5775,265266	183,5956828	110,8741
2,54	38,46	9262,9681	255,1021	0,3749	1,0367	5790,321486	159,4654537	95,6367
2,92	33,47	9262,9681	222,0333	0,3748	1,0370	5791,349767	138,8186539	83,2147
4,12	23,74	9262,9681	157,4705	0,3740	1,0390	5798,237328	98,57003458	58,9004
2,12	46,12	9262,9681	349,5844	0,3730	1,0419	5807,682807	219,1819491	130,4025
2,72	35,94	9262,9681	272,4239	0,3727	1,0428	5810,74408	170,8939834	101,5299
2,85	34,27	9262,9681	259,8263	0,3718	1,0452	5818,808858	163,2175885	96,6087
3,54	27,63	9262,9681	209,4357	0,3715	1,0461	5821,764721	131,6301003	77,8056
4,90	19,94	9262,9681	151,1716	0,3707	1,0483	5828,838819	95,12664953	56,0450

Diameter nozzle	ri primary	ri sekunder	tekanan (bar)	ri syngas (L/min)	ri syngas (kg/s)	temperatur (Celcius)								temperatur		
						1	2	3	4	5	6	7	8	min	max	mean
10 mm	0,025	0,04	1	2,21	0,03757	218	366	411	297	175	168	167	143	143	411	243
			0,8	1,89	0,03213	207	358	381	252	166	162	160	132	132	381	227
			0,6	1,65	0,02805	195	343	354	216	159	158	150	135	135	354	214
			0,4	1,32	0,02244	190	328	332	215	164	156	145	133	133	332	208
		0,05	0,2	0,98	0,01666	173	263	256	172	150	149	142	123	123	263	178
			1	2,23	0,03791	199	370	406	289	178	158	156	125	125	406	235
			0,8	1,92	0,03264	190	314	360	259	162	155	152	129	129	360	215
			0,6	1,58	0,02686	182	302	333	224	157	154	152	119	119	333	203
			0,4	1,3	0,0221	169	289	292	186	152	152	146	117	117	292	188
		0,06	0,2	1,1	0,0187	163	245	236	168	152	150	144	112	112	245	171
			1	2,23	0,03791	232	345	257	200	178	168	134	118	118	345	204
			0,8	1,9	0,0323	234	351	267	211	174	154	121	107	107	351	202
			0,6	1,64	0,02788	230	347	259	206	177	155	119	109	109	347	200
		0,07	0,4	1,4	0,0238	224	333	224	203	163	154	121	103	103	333	191
			0,2	0,92	0,01564	202	321	201	197	166	153	113	101	101	321	182
			1	2,32	0,03944	234	347	259	202	180	170	136	120	120	347	206
			0,8	1,87	0,03179	236	353	269	213	176	156	123	109	109	353	204
		0,08	0,6	1,62	0,02754	232	349	261	208	179	157	121	111	111	349	202
			0,4	1,41	0,02397	226	335	226	205	165	156	123	105	105	335	193
			0,2	1	0,017	204	323	203	199	168	155	115	103	103	323	184
			1	2,22	0,03774	230	343	255	198	176	166	132	116	116	343	202
		0,08	0,8	1,73	0,02941	232	349	265	209	172	152	119	105	105	349	200
			0,6	1,65	0,02805	228	345	257	204	175	153	117	107	107	345	198
			0,4	1,33	0,02261	222	331	222	201	161	152	119	101	101	331	189
			0,2	0,96	0,01632	200	319	199	195	164	151	111	99	99	319	180

afr	Φ	lhv	energi bahan bakar (kW)	efisiensi	sfc (kg/kWh)	h° RP (entalpi Pembakaran) KJ/Kg	Qloss	DAYA BURNER (kW)
1,73	56,50	9262,9681	348,0097	0,3853	1,0085	5693,483804	213,9041865	134,1055
2,02	48,32	9262,9681	297,6192	0,3819	1,0176	5725,308233	183,9541535	113,6650
2,32	42,18	9262,9681	259,8263	0,3788	1,0259	5753,769791	161,3932426	98,4330
2,90	33,75	9262,9681	207,8610	0,3765	1,0323	5775,724639	129,6072609	78,2537
3,90	25,06	9262,9681	154,3210	0,3689	1,0535	5845,80988	97,39119259	56,9299
1,32	74,12	9262,9681	351,1591	0,3848	1,0100	5698,506976	216,0303995	135,1287
1,53	63,81	9262,9681	302,3433	0,3796	1,0239	5746,864338	187,577652	114,7656
1,86	52,51	9262,9681	248,8033	0,3765	1,0322	5775,266017	155,1236452	93,6797
2,26	43,21	9262,9681	204,7116	0,3720	1,0446	5816,692949	128,5489142	76,1627
2,67	36,56	9262,9681	173,2175	0,3669	1,0592	5864,22557	109,6610182	63,5565
1,58	61,76	9262,9681	351,1591	0,3779	1,0284	5762,543748	218,4580335	132,7011
1,86	52,62	9262,9681	299,1939	0,3786	1,0266	5756,35298	185,9302013	113,2637
2,15	45,42	9262,9681	258,2516	0,3781	1,0278	5760,48001	160,6021827	97,6494
2,52	38,78	9262,9681	220,4586	0,3766	1,0321	5774,909586	137,4428481	83,0158
3,84	25,48	9262,9681	144,8728	0,3752	1,0358	5787,237328	90,51239181	54,3604
1,77	55,08	9262,9681	365,3315	0,3781	1,0278	5760,48001	227,1933316	138,1381
2,20	44,39	9262,9681	294,4698	0,3788	1,0260	5754,290215	182,9288859	111,5409
2,54	38,46	9262,9681	255,1021	0,3783	1,0272	5758,416246	158,5867834	96,5154
2,92	33,47	9262,9681	222,0333	0,3768	1,0315	5772,856353	138,3753668	83,6580
4,12	23,74	9262,9681	157,4705	0,3755	1,0351	5785,181799	98,34809058	59,1224
2,12	46,12	9262,9681	349,5844	0,3777	1,0291	5764,607978	217,5563051	132,0281
2,72	35,94	9262,9681	272,4239	0,3783	1,0272	5768,416246	169,3550218	103,0689
2,85	34,27	9262,9681	259,8263	0,3779	1,0284	5762,543748	161,6393521	98,1869
3,54	27,63	9262,9681	209,4357	0,3763	1,0327	5776,963295	130,6171401	78,8186
4,90	19,94	9262,9681	151,1716	0,3750	1,0364	5789,293319	94,48126696	56,6904

Diameter nozzle	m primary	m sekunder	tekanan (bar)	m syngas (L/min)	m syngas (kg/s)	temperatur (Celsius)								temperatur		
						1	2	3	4	5	6	7	8	min	max	mean
10 mm	0,03	0,04	1	2,21	0,03757	387	297	257	233	187	145	113	109	109	387	216
			0,8	1,89	0,03213	388	312	289	279	182	167	115	98	98	388	229
			0,6	1,65	0,02805	372	302	290	303	172	166	114	99	99	372	227
			0,4	1,32	0,02244	361	281	234	190	160	178	117	97	97	361	202
			0,2	0,98	0,01666	315	245	201	178	134	163	109	100	100	315	181
		0,05	1	2,23	0,03791	445	309	299	301	278	193	113	108	108	445	256
			0,8	1,92	0,03264	417	316	284	254	165	130	98	99	98	417	220
			0,6	1,58	0,02686	404	317	273	294	164	139	100	95	95	404	223
			0,4	1,3	0,0221	386	325	275	282	140	135	99	93	93	386	217
			0,2	1,1	0,0187	349	288	251	274	146	107	95	97	95	349	201
		0,06	1	2,23	0,03791	415	319	283	271	253	200	154	107	107	415	250
			0,8	1,9	0,0323	424	323	291	261	172	137	105	106	105	424	227
			0,6	1,64	0,02788	411	324	280	301	171	146	107	102	102	411	230
			0,4	1,4	0,0238	393	332	282	289	147	142	106	100	100	393	224
			0,2	0,92	0,01564	356	295	258	281	153	114	102	104	102	356	208
		0,07	1	2,32	0,03944	401	322	257	246	172	145	112	101	101	401	220
			0,8	1,87	0,03179	422	321	289	259	170	135	103	104	103	422	225
			0,6	1,62	0,02754	409	322	278	299	169	144	105	100	100	409	228
			0,4	1,41	0,02397	391	330	280	287	145	140	104	98	98	391	222
			0,2	1	0,017	354	293	256	279	151	112	100	102	100	354	206
		0,08	1	2,22	0,03774	365	288	276	201	187	154	113	98	98	365	210
			0,8	1,73	0,02941	386	310	287	277	180	165	113	96	96	386	227
			0,6	1,65	0,02805	370	300	288	301	170	164	112	97	97	370	225
			0,4	1,33	0,02261	359	279	232	188	158	176	115	95	95	359	200
			0,2	0,96	0,01632	313	243	199	176	132	161	107	98	98	313	179

afr	Φ	lhv	energi bahan bakar (kW)	efisiensi	sfc (kg/kWh)	h° RP (entalpi Pembakaran) KJ/Kg	Q loss	DAYA BURNER (kW)
1,86	52,47	9262,9681	348,0097	0,3826	1,0158	5718,904597	214,8592457	133,1505
2,18	44,87	9262,9681	297,6192	0,3827	1,0155	5717,857915	183,7147748	113,9044
2,50	39,17	9262,9681	259,8263	0,3809	1,0203	5734,566139	160,8545802	98,9717
3,12	31,34	9262,9681	207,8610	0,3795	1,0242	5748,127571	128,9879827	78,8730
4,20	23,27	9262,9681	154,3210	0,3746	1,0376	5793,391556	96,51790332	57,8031
1,32	74,12	9262,9681	351,1591	0,3892	0,9986	5657,768441	214,4860016	136,6731
1,53	63,81	9262,9681	302,3433	0,3860	1,0068	5687,42072	185,6374123	116,7059
1,86	52,51	9262,9681	248,8033	0,3845	1,0107	5701,082023	153,1310631	95,6723
2,26	43,21	9262,9681	204,7116	0,3825	1,0161	5719,951087	126,410919	78,3007
2,67	36,56	9262,9681	173,2175	0,3783	1,0272	5758,416246	107,6823838	65,5351
1,58	61,76	9262,9681	351,1591	0,3858	1,0074	5689,521197	215,6897486	135,4694
1,86	52,62	9262,9681	299,1939	0,3868	1,0048	5680,032076	183,4650361	115,7288
2,15	45,42	9262,9681	258,2516	0,3853	1,0086	5693,731697	158,7412397	99,5103
2,52	38,78	9262,9681	220,4586	0,3833	1,0140	5712,626595	135,960513	84,4981
3,84	25,48	9262,9681	144,8728	0,3791	1,0251	5751,197015	89,94872131	54,9241
1,77	55,08	9262,9681	365,3315	0,3842	1,0116	5704,236325	224,9750807	140,3564
2,20	44,39	9262,9681	294,4698	0,3866	1,0054	5682,142363	180,6353057	113,8345
2,54	38,46	9262,9681	255,1021	0,3851	1,0092	5695,826185	156,8630531	98,2391
2,92	33,47	9262,9681	222,0333	0,3831	1,0146	5714,718704	136,9818073	85,0515
4,12	23,74	9262,9681	157,4705	0,3789	1,0257	5753,259022	97,80540337	59,6651
2,12	46,12	9262,9681	349,5844	0,3801	1,0224	5714,840148	216,6970472	132,8874
2,72	35,94	9262,9681	272,4239	0,3825	1,0161	5719,951087	168,2237615	104,2001
2,85	34,27	9262,9681	259,8263	0,3807	1,0209	5736,643259	160,9128434	98,9134
3,54	27,63	9262,9681	209,4357	0,3795	1,0242	5748,083916	129,9641773	79,4715
4,90	19,94	9262,9681	151,1716	0,3743	1,0382	5795,433797	94,58147957	56,5902

Lampiran II: Tabel Perhitungan Reaktan

Diameter nozzle outlet	m primary air (kg/s)	m secondary air (kg/s)	tekanan (bar)	temperatur max (kelvin)	h CO2	h CO	h O2	h N2	q CH4	h CH4	q H2	h H2	Σh reactan
10 mm	0,01	0,04	1	627	23566	18435	18798	18377	53,694	17557,939	29,367	9603,012	-4899,90
			0,8	594	21996	17429	17737	17382	51,794	15227,552	29,338	8625,247	-5944,85
			0,6	603	22422	17702	18025	17653	52,315	15851,474	29,345	8891,587	-5660,66
			0,4	566	20685	16580	16844	16542	50,165	13343,906	29,315	7797,895	-6825,25
			0,2	562	20500	16459	16717	16423	49,931	13082,033	29,312	7679,835	-6950,50
			1	575	21104	16852	17131	16812	50,690	13939,768	29,322	8063,642	-6542,94
		0,05	0,8	583	21478	17094	17386	17052	51,156	14477,090	29,329	8300,005	-6291,45
			0,6	583	21478	17094	17386	17052	51,156	14477,090	29,329	8300,005	-6291,45
			0,4	566	20685	16580	16844	16542	50,165	13343,906	29,315	7797,895	-6825,25
			0,2	536	19303	15677	15896	15647	48,410	11424,783	29,293	6913,089	-7762,09
			1	632	23805	18588	18960	18529	53,979	17921,113	29,372	9751,470	-4740,84
		0,06	0,8	649	24626	19110	19512	19045	54,943	19175,162	29,390	10256,948	-4198,39
			0,6	639	24142	18802	19187	18742	54,377	18433,907	29,379	9959,469	-4517,66
			0,4	616	23040	18099	18443	18045	53,064	16768,189	29,357	9276,712	-5249,11
			0,2	604	22470	17733	18057	17683	52,373	15921,343	29,346	8921,194	-5629,05
		0,07	1	705	27374	20846	21349	20758	58,041	23506,681	29,461	11931,625	-2393,74
			0,8	706	27423	20877	21382	20789	58,095	23586,689	29,462	11961,686	-2361,27
			0,6	694	26829	20593	20986	20420	57,443	22632,554	29,445	11601,346	-2750,42
			0,4	693	26779	20472	20953	20389	57,388	22553,635	29,444	11571,355	-2782,79
			0,2	689	26582	20347	20821	20266	57,169	22238,882	29,438	11451,450	-2912,21
		0,08	1	663	25306	19542	19968	19472	55,729	20229,778	29,405	10674,142	-3749,66
			0,8	676	25942	19944	20393	19869	56,453	21226,266	29,421	11062,361	-3331,61
			0,6	669	25599	19727	20164	19655	56,064	20687,664	29,413	10853,217	-3556,94
			0,4	662	25258	19511	19935	19441	55,673	20153,805	29,404	10644,312	-3781,76
			0,2	651	24723	19172	19577	19106	55,056	19324,626	29,392	10316,494	-4134,41

Diameter nozzle outlet	m primary air (kg/s)	m secondary air (kg/s)	tekanan (bar)	temperat ur max (kelvin)	h CO2	h CO	h O2	h N2	cp CH4	h CH4	cp H2	h H2	Σnh reactan
10 mm	0,015	0,04	1	629	23661	18496	18863	18438	53,808	17702,896	29,369	9662,384	-4836,35
			0.8	596	22091	17489	17801	17443	51,910	15365,436	29,339	8684,415	-5881,73
			0.6	605	22517	17763	18090	17714	52,431	15991,321	29,347	8950,804	-5597,45
			0.4	568	20777	16641	16908	16602	50,282	13475,526	29,317	7856,936	-6762,60
			0.2	564	20592	16520	16781	16483	50,048	13212,741	29,314	7738,861	-6887,88
			1	637	24046	18741	19122	18681	54,264	18286,880	29,377	9900,021	-4581,45
			0.8	654	24868	19264	19674	19197	55,225	19549,573	29,395	10405,845	-4038,30
			0.6	644	24384	18956	19349	18893	54,661	18803,265	29,384	10108,157	-4358,08
	0,05	0,05	0.4	621	23279	18252	18604	18196	53,351	17125,583	29,361	9424,979	-5090,46
			0.2	609	22707	17885	18218	17834	52,661	16272,314	29,350	9069,273	-5470,99
			1	751	29680	22290	22877	22180	60,480	27276,643	29,537	13321,217	-890,92
			0.8	732	28722	21691	22244	21591	59,485	25697,728	29,503	12745,509	-1514,03
			0.6	699	27076	20659	21151	20573	57,716	23028,522	29,452	11751,384	-2588,46
			0.4	698	27026	20628	21118	20543	57,661	22949,146	29,451	11721,365	-2620,86
			0.2	694	26829	20503	20986	20420	57,443	22632,554	29,445	11601,346	-2750,42
	0,07	0,07	1	575	21104	16852	17131	16812	50,690	13939,768	29,322	8063,642	-6542,94
			0.8	583	21478	17094	17386	17052	51,156	14477,090	29,329	8300,005	-6291,45
			0.6	583	21478	17094	17386	17052	51,156	14477,090	29,329	8300,005	-6291,45
			0.4	566	20685	16580	16844	16542	50,165	13343,906	29,315	7797,895	-6825,25
			0.2	536	19303	15677	15896	15647	48,410	11424,783	29,293	6913,089	-7762,09
			1	595	22044	17459	17769	17413	51,852	15296,439	29,338	8654,830	-5913,29
			0.8	654	24868	19264	19674	19197	55,225	19549,573	29,395	10405,845	-4038,30
	0,08	0,08	0.6	634	23901	18649	19025	18590	54,093	18067,110	29,374	9810,879	-4677,09
			0.4	618	23136	18160	18508	18106	53,179	16910,829	29,359	9336,009	-5185,67
			0.2	601	22327	17641	17961	17593	52,200	15712,060	29,343	8832,381	-5723,85



Diameter nozzle outlet	m primary air (kg/s)	m secondary air (kg/s)	tekanan (bar)	temperatur max (kelvin)	h CO2	h CO	h O2	h N2	cp CH4	h CH4	cp H2	h H2	Σ nh reactan
10 mm	0,02	0,04	1	640	24190	18833	19219	18772	54,434	18507,575	29,380	9989,198	-4485,76
			0.8	657	25014	19357	19772	19289	55,393	19775,418	29,398	10495,236	-3942,15
			0.6	647	24529	19049	19447	18984	54,830	19026,100	29,387	10197,419	-4262,28
			0.4	624	23422	18343	18701	18287	53,522	17341,288	29,364	9513,980	-4995,20
		0,05	0.2	612	22849	17976	18314	17924	52,834	16484,190	29,353	9158,157	-5375,97
			1	605	22517	17763	18090	17714	52,431	15991,321	29,347	8950,804	-5597,45
			0.8	603	22422	17702	18025	17653	52,315	15851,474	29,345	8891,587	-5660,66
			0.6	571	20917	16731	17003	16692	50,457	13673,808	29,319	7945,512	-6668,55
		0,06	0.4	571	20917	16731	17003	16692	50,457	13673,808	29,319	7945,512	-6668,55
			0.2	550	19945	16097	16338	16064	49,230	12307,422	29,303	7325,823	-7325,87
			1	606	22564	17793	18122	17744	52,488	16061,408	29,348	8980,417	-5565,84
			0.8	595	22044	17459	17769	17413	51,852	15296,439	29,338	8654,830	-5976,41
	0,07	0,07	0.6	593	21949	17398	17705	17352	51,736	15158,776	29,337	8595,667	-6007,96
			0.4	592	21902	17368	17673	17322	51,678	15090,109	29,336	8566,090	-6007,96
			0.2	596	22091	17489	17801	17443	51,910	15365,436	29,339	8684,415	-5881,73
			1	604	22470	17733	18057	17683	52,373	15921,343	29,346	8921,194	-5629,05
		0,08	0.8	593	21949	17398	17705	17352	51,736	15158,776	29,337	8595,667	-5976,41
			0.6	591	21854	17337	17641	17292	51,620	15021,553	29,335	8536,515	-6039,52
			0.4	590	21807	17307	17609	17262	51,562	14953,107	29,334	8506,943	-6071,06
			0.2	594	21996	17429	17737	17382	51,794	15227,552	29,338	8625,247	-5944,85
		0,08	1	574	21057	16822	17099	16782	50,632	13873,109	29,322	8034,107	-6574,35
			0.8	571	20917	16731	17003	16692	50,457	13673,808	29,319	7945,512	-6668,55
			0.6	567	20731	16610	16876	16572	50,223	13409,659	29,316	7827,415	-6793,93
			0.4	570	20870	16701	16971	16662	50,399	13607,601	29,318	7915,985	-6699,95
		0,09	0.2	565	20639	16550	16813	16513	50,107	13278,267	29,315	7766,377	-6856,57

Diameter nozzle outlet	m primary air (kg/s)	m secondary air (kg/s)	tekanan (bar)	temperatur max (kelvin)	$\dot{h}_{CO_2}$	$\dot{h}_{CO}$	$\dot{h}_{O_2}$	$\dot{h}_{N_2}$	$\dot{q}_p CH_4$	$\dot{h}_{CH_4}$	$\dot{q}_p H_2$	$\dot{h}_{H_2}$	$\Sigma nh$ reactan
10 mm	0,025	0,04	1	684	26346	20199	20664	20120	56,907	21865,366	29,432	11308,534	-3066,28
			0,8	654	24863	19261	19671	19193	55,218	19540,776	29,395	10402,357	-4042,05
			0,6	627	23542	18420	18782	18362	53,666	17522,102	29,367	9588,310	-4915,64
			0,4	605	22527	17769	18096	17720	52,442	16005,765	29,347	8956,910	-5590,93
			0,2	536	19919	15688	15908	15668	48,431	11446,812	29,293	6923,518	-7751,08
			1	679	26111	20051	20506	19974	56,644	21493,444	29,426	11165,532	-3220,46
			0,8	633	23862	18624	18998	18564	54,046	18006,589	29,373	9786,271	-4703,50
			0,6	606	22548	17783	18110	17733	52,468	16037,065	29,347	8970,136	-5576,81
			0,4	565	20645	16554	16817	16517	50,115	13287,692	29,315	7772,619	-6852,07
			0,2	518	18486	15137	15332	15113	47,357	10323,744	29,279	6382,809	-8320,96
	1	618	23136	18160	18508	18106	53,179	16910,829	29,359	9336,009	-5185,67		
	0,8	624	23422	18343	18701	18287	53,522	17341,288	29,364	9513,980	-4995,20		
	0,6	620	23231	18221	18672	18166	53,293	17053,892	29,360	9395,319	-5122,21		
	0,4	606	22564	17793	18122	17744	52,488	16061,408	29,348	8890,417	-5565,84		
	0,2	594	21996	17429	17737	17382	51,794	15227,552	29,338	8625,247	-5944,85		
	1	620	23231	18221	18672	18166	53,293	17053,892	29,360	9395,319	-5122,21		
	0,8	626	23518	18405	18766	18347	53,637	17485,617	29,366	9573,331	-4931,67		
	0,6	622	23327	18282	18637	18226	53,408	17197,379	29,362	9454,643	-5058,71		
	0,4	608	22659	17854	18186	17804	52,604	16201,904	29,350	9039,651	-5502,61		
	0,2	596	22091	17489	17801	17443	51,910	15365,436	29,339	8684,415	-5881,73		
0,07	0,08	1	616	23040	18099	18443	18045	53,064	16768,189	29,357	9276,712	-5249,11	
		0,8	622	23327	18282	18637	18226	53,408	17197,379	29,362	9454,643	-5058,71	
		0,6	618	23136	18160	18508	18106	53,179	16910,829	29,359	9336,009	-5185,67	
		0,4	604	22470	17733	18057	17683	52,373	15921,343	29,346	8921,194	-5629,05	
		0,2	592	21902	17368	17673	17322	51,678	15090,109	29,336	8566,090	-6007,96	

Diameter nozzle outlet	m primary air (kg/s)	m secondary air (kg/s)	tekanan (bar)	temperatur max (kelvin)	h CO <sub>2</sub>	h CO	h O <sub>2</sub>	h N <sub>2</sub>	cp CH <sub>4</sub>	h CH <sub>4</sub>	cp H <sub>2</sub>	h H <sub>2</sub>	Σh reactan
10 mm	0,03	0,04	1	560	25160	19449	19870	19380	55,562	20002,154	29,402	10584,668	-3845,96
			0.8	661	25209	19480	19903	19411	55,618	20077,931	29,403	10614,488	-3813,87
			0.6	645	24432	19887	19824	18924	54,717	19877,442	29,385	10137,907	-4326,15
			0.4	634	23901	18649	19025	18590	54,093	18067,110	29,374	9810,879	-4677,09
			0.2	588	21713	17246	17545	17202	51,446	14816,547	29,333	8447,806	-6134,05
			1	718	28021	21252	21779	21158	58,741	24553,711	29,481	12322,906	-1970,99
			0.8	690	26631	20378	20854	20297	57,224	22317,432	29,440	11481,418	-2879,90
			0.6	677	25991	19975	20426	19899	56,508	21303,592	29,422	11092,260	-3299,40
	0,05	0,05	0.4	659	25111	19418	19837	19350	55,506	19926,477	29,401	10554,853	-3878,03
			0.2	622	23327	18282	18637	18226	53,408	17197,379	29,362	9454,643	-5058,71
			1	688	26532	20316	20788	20236	57,115	22160,426	29,437	11421,488	-2944,50
			0.8	697	26977	20596	21085	20512	57,607	22869,861	29,449	11691,351	-2653,25
			0.6	684	26335	20192	20656	20113	56,895	21847,533	29,431	11301,693	-3073,65
			0.4	666	25453	19634	20066	19563	55,897	20458,282	29,409	10763,657	-3653,32
			0.2	629	23661	18496	18863	18438	53,808	17702,896	29,369	9662,384	-4836,35
			1	674	25844	19882	20328	19807	56,342	21071,899	29,419	11002,581	-3396,03
	0,07	0,07	0.8	695	26878	20534	21019	20451	57,498	22711,564	29,446	11631,342	-2718,03
			0.6	682	26237	20130	20590	20052	56,784	21691,649	29,429	11241,829	-3138,20
			0.4	664	25355	19573	20001	19502	55,785	20305,848	29,407	10703,975	-3717,55
			0.2	627	23566	18435	18798	18377	53,694	17557,939	29,367	9603,012	-4899,90
			1	638	24094	18772	19154	18711	54,321	18360,342	29,378	9929,743	-4549,56
			0.8	659	25111	19418	19837	19350	55,506	19926,477	29,401	10554,853	-3878,03
			0.6	643	24335	18925	19317	18863	54,604	18729,190	29,383	10078,411	-4390,01
			0.4	632	23805	18588	18960	18529	53,979	17921,113	29,372	9751,470	-4740,84
	0,08	0,08	0.2	586	21619	17185	17481	17142	51,330	14680,430	29,331	8388,678	-6197,02

**Lampiran II: Tabel Perhitungan  $\Sigma M$**

komposisi	Koefisien Reaktan	Mi	$\Sigma M$
CO	0.1957	28.01	5.48
H <sub>2</sub>	0.0534	2.106	0.11
CH <sub>4</sub>	0.0181	16.04	0.29
N <sub>2</sub>	0.4926	28.01	13.80
CO <sub>2</sub>	0.1123	44.01	4.94
O <sub>2</sub>	0.1279	32	4.09
Total			28.72

## Lampiran III: Tabel A1 *Thermodynamics*

**TABLE A-1** Atomic or Molecular Weights and Critical Properties of Selected Elements and Compounds

Substance	Chemical Formula	$M$ (kg/kmol)	$T_c$ (K)	$p_c$ (bar)	$Z_c = \frac{p_c V_c}{RT_c}$
Acetylene	$C_2H_2$	26.04	309	62.8	0.274
Air (equivalent)	—	28.97	133	37.7	0.284
Ammonia	$NH_3$	17.03	406	112.8	0.242
Argon	Ar	39.94	151	48.6	0.290
Benzene	$C_6H_6$	78.11	563	49.3	0.274
Butane	$C_4H_{10}$	58.12	425	38.0	0.274
Carbon	C	12.01	—	—	—
Carbon dioxide	$CO_2$	44.01	304	73.9	0.276
Carbon monoxide	CO	28.01	133	35.0	0.294
Copper	Cu	63.54	—	—	—
Ethane	$C_2H_6$	30.07	305	48.8	0.285
Ethyl alcohol	$C_2H_5OH$	46.07	516	63.8	0.249
Ethylene	$C_2H_4$	28.05	283	51.2	0.270
Helium	He	4.003	5.2	2.3	0.300
Hydrogen	$H_2$	2.016	33.2	13.0	0.304
Methane	$CH_4$	16.04	191	46.4	0.290
Methyl alcohol	$CH_3OH$	32.04	513	79.5	0.220
Nitrogen	$N_2$	28.01	126	33.9	0.291
Octane	$C_8H_{18}$	114.22	569	24.9	0.258
Oxygen	$O_2$	32.00	154	50.5	0.290
Propane	$C_3H_8$	44.09	370	42.7	0.276
Propylene	$C_3H_6$	42.08	365	46.2	0.276
Refrigerant 12	$CCl_2F_2$	120.92	385	41.2	0.278
Refrigerant 22	$CHClF_2$	86.48	369	49.8	0.267
Refrigerant 134a	$CF_3CH_2F$	102.03	374	40.7	0.260
Sulfur dioxide	$SO_2$	64.06	431	78.7	0.268
Water	$H_2O$	18.02	647.3	220.9	0.233

Sources: Adapted from *International Critical Tables* and L. C. Nelson and E. F. Obert, Generalized Compressibility Charts, *Chem. Eng.*, 61: 203 (1954).

## Lampiran IV: Tabel A21 *Thermodynamics*

**TABLE A-21** Variation of  $\bar{c}_p$  with Temperature for Selected Ideal Gases

$$\frac{\bar{c}_p}{R} = \alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3 + \varepsilon T^4$$

$T$  is in K, equations valid from 300 to 1000 K

Gas	$\alpha$	$\beta \times 10^3$	$\gamma \times 10^6$	$\delta \times 10^9$	$\varepsilon \times 10^{12}$
CO	3.710	-1.619	3.692	-2.032	0.240
CO <sub>2</sub>	2.401	8.735	-6.607	2.002	0
H <sub>2</sub>	3.057	2.677	-5.810	5.521	-1.812
H <sub>2</sub> O	4.070	-1.108	4.152	-2.964	0.807
O <sub>2</sub>	3.626	-1.878	7.055	-6.764	2.156
N <sub>2</sub>	3.675	-1.208	2.324	-0.632	-0.226
Air	3.653	-1.337	3.294	-1.913	0.2763
SO <sub>2</sub>	3.267	5.324	0.684	-5.281	2.559
CH <sub>4</sub>	3.826	-3.979	24.558	-22.733	6.963
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1.410	19.057	-24.501	16.391	-4.135
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.426	11.383	7.989	-16.254	6.749
Monatomic gases <sup>a</sup>	2.5	0	0	0	0

<sup>a</sup>For monatomic gases, such as He, Ne, and Ar,  $\bar{c}_p$  is constant over a wide temperature range and is very nearly equal to  $5/2 R$ .

Source: Adapted from K. Wark, *Thermodynamics*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1983, as based on NASA SP-273, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1971.

Table A-23

Lampiran V: Tabel A23 Thermodynamics

Carbon Dioxide, CO <sub>2</sub> ( $R_g = -9.35201 \text{ kJ/kmol}$ )				Carbon Monoxide, CO ( $R_g = -11.05310 \text{ kJ/kmol}$ )				Water Vapor, H <sub>2</sub> O ( $R_g = -2.41520 \text{ kJ/kmol}$ )				Oxygen, O <sub>2</sub> ( $R_g = 0 \text{ kJ/kmol}$ )				Nitrogen, N <sub>2</sub> ( $R_g = 0 \text{ kJ/kmol}$ )			
$T$	$\bar{h}$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{h}$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{s}$	$\bar{h}$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{s}$	$\bar{h}$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{s}$	$\bar{h}$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{s}$
220	6.011	47.72	20.266	6.011	4.902	188.683	7.295	5.460	178.576	6.480	43.75	104.71	6.391	4.502	102.638	6.391	4.502	102.638	230
230	6.038	50.26	20.469	6.038	4.771	187.981	7.628	5.715	181.054	6.694	47.92	107.261	6.694	4.771	105.180	6.694	4.771	105.180	240
240	6.065	52.80	20.672	6.065	4.640	187.386	7.975	5.960	183.129	6.998	52.17	109.810	6.998	4.640	107.731	6.998	4.640	107.731	250
250	6.092	55.35	20.875	6.092	4.509	186.791	8.322	6.205	185.204	7.295	56.42	112.361	7.295	4.509	109.836	7.295	4.509	109.836	260
260	6.119	57.89	21.078	6.119	4.378	186.196	8.670	6.466	187.279	7.592	60.67	114.911	7.592	4.378	111.861	7.592	4.378	111.861	270
270	6.146	60.43	21.281	6.146	4.247	185.601	9.017	6.721	189.354	7.889	64.92	117.461	7.889	4.247	113.911	7.889	4.247	113.911	280
280	6.173	62.97	21.484	6.173	4.116	185.006	9.365	6.980	191.429	8.187	69.17	120.011	8.187	4.116	115.961	8.187	4.116	115.961	290
290	6.200	65.51	21.687	6.200	3.985	184.411	9.712	7.239	193.504	8.486	73.42	122.561	8.486	3.985	118.011	8.486	3.985	118.011	300
300	6.227	68.05	21.890	6.227	3.854	183.816	10.060	7.498	195.579	8.785	77.67	125.111	8.785	3.854	120.061	8.785	3.854	120.061	310
310	6.254	70.59	22.093	6.254	3.723	183.221	10.407	7.757	197.654	9.084	81.92	127.661	9.084	3.723	122.111	9.084	3.723	122.111	320
320	6.281	73.13	22.296	6.281	3.592	182.626	10.755	8.016	199.729	9.383	86.17	130.211	9.383	3.592	124.161	9.383	3.592	124.161	330
330	6.308	75.67	22.500	6.308	3.461	182.031	11.102	8.275	201.804	9.682	90.42	132.761	9.682	3.461	126.211	9.682	3.461	126.211	340
340	6.335	78.21	22.703	6.335	3.330	181.436	11.450	8.534	203.879	9.981	94.67	135.311	9.981	3.330	128.261	9.981	3.330	128.261	350
350	6.362	80.75	22.906	6.362	3.200	180.841	11.797	8.793	205.954	10.280	98.92	137.861	10.280	3.200	130.311	10.280	3.200	130.311	360
360	6.389	83.29	23.110	6.389	3.069	180.246	12.145	9.052	208.029	10.579	103.17	140.411	10.579	3.069	132.361	10.579	3.069	132.361	370
370	6.416	85.83	23.313	6.416	2.938	179.651	12.492	9.311	210.104	10.878	107.42	142.961	10.878	2.938	134.411	10.878	2.938	134.411	380
380	6.443	88.37	23.516	6.443	2.807	179.056	12.840	9.570	212.179	11.177	111.67	145.511	11.177	2.807	136.461	11.177	2.807	136.461	390
390	6.470	90.91	23.720	6.470	2.676	178.461	13.187	9.829	214.254	11.476	115.92	148.061	11.476	2.676	138.511	11.476	2.676	138.511	400
400	6.497	93.45	23.923	6.497	2.545	177.866	13.535	10.088	216.329	11.775	120.17	150.611	11.775	2.545	140.561	11.775	2.545	140.561	410
410	6.524	95.99	24.126	6.524	2.414	177.271	13.882	10.347	218.404	12.074	124.42	153.161	12.074	2.414	142.611	12.074	2.414	142.611	420
420	6.551	98.53	24.330	6.551	2.283	176.676	14.230	10.606	220.479	12.373	128.67	155.711	12.373	2.283	144.661	12.373	2.283	144.661	430
430	6.578	101.07	24.533	6.578	2.152	176.081	14.577	10.865	222.554	12.672	132.92	158.261	12.672	2.152	146.711	12.672	2.152	146.711	440
440	6.605	103.61	24.736	6.605	2.021	175.486	14.925	11.124	224.629	12.971	137.17	160.811	12.971	2.021	148.761	12.971	2.021	148.761	450
450	6.632	106.15	24.940	6.632	1.890	174.891	15.272	11.383	226.704	13.270	141.42	163.361	13.270	1.890	150.811	13.270	1.890	150.811	460
460	6.659	108.69	25.143	6.659	1.759	174.296	15.620	11.642	228.779	13.569	145.67	165.911	13.569	1.759	152.861	13.569	1.759	152.861	470
470	6.686	111.23	25.346	6.686	1.628	173.701	15.967	11.901	230.854	13.868	149.92	168.461	13.868	1.628	154.911	13.868	1.628	154.911	480
480	6.713	113.77	25.550	6.713	1.497	173.106	16.315	12.160	232.929	14.167	154.17	171.011	14.167	1.497	156.961	14.167	1.497	156.961	490
490	6.740	116.31	25.753	6.740	1.366	172.511	16.662	12.419	235.004	14.466	158.42	173.561	14.466	1.366	159.011	14.466	1.366	159.011	500
500	6.767	118.85	25.956	6.767	1.235	171.916	17.010	12.678	237.079	14.765	162.67	176.111	14.765	1.235	161.061	14.765	1.235	161.061	510
510	6.794	121.39	26.160	6.794	1.104	171.321	17.357	12.937	239.154	15.064	166.92	178.661	15.064	1.104	163.111	15.064	1.104	163.111	520
520	6.821	123.93	26.363	6.821	0.973	170.726	17.704	13.196	241.229	15.363	171.17	181.211	15.363	0.973	165.161	15.363	0.973	165.161	530
530	6.848	126.47	26.566	6.848	0.842	170.131	18.051	13.455	243.304	15.662	175.42	183.761	15.662	0.842	167.211	15.662	0.842	167.211	540
540	6.875	129.01	26.770	6.875	0.711	169.536	18.398	13.714	245.379	15.961	179.67	186.311	15.961	0.711	169.261	15.961	0.711	169.261	550
550	6.902	131.55	26.973	6.902	0.580	168.941	18.745	13.973	247.454	16.260	183.92	188.861	16.260	0.580	171.311	16.260	0.580	171.311	560
560	6.929	134.09	27.176	6.929	0.449	168.346	19.092	14.232	249.529	16.559	188.17	191.411	16.559	0.449	173.361	16.559	0.449	173.361	570
570	6.956	136.63	27.380	6.956	0.318	167.751	19.439	14.491	251.604	16.858	192.42	193.961	16.858	0.318	175.411	16.858	0.318	175.411	580
580	6.983	139.17	27.583	6.983	0.187	167.156	19.786	14.750	253.679	17.157	196.67	196.511	17.157	0.187	177.461	17.157	0.187	177.461	590
590	7.010	141.71	27.786	7.010	0.056	166.561	20.133	15.009	255.754	17.456	200.92	199.061	17.456	0.056	179.511	17.456	0.056	179.511	600



Figure A-28 (Continued)

Rk, $\lambda$ , and $h$ (kN/m <sup>2</sup> , °C/kN/m <sup>2</sup> , K)									
$T$	Carbon Dioxide, CO <sub>2</sub> ( $R = -39.5530$ kJ/kmol)			Carbon Monoxide, CO ( $R = -110.530$ kJ/kmol)			Water Vapor, H <sub>2</sub> O ( $R = -24.450$ kJ/kmol)		
	$\lambda$	$\mu$	$\sigma$	$\lambda$	$\mu$	$\sigma$	$\lambda$	$\mu$	$\sigma$
600	3.2280	1.7291	24.3109	17.611	12.622	218.204	20.402	15.413	212.920
610	3.2274	1.7083	24.3083	17.915	12.845	218.708	20.705	15.693	213.529
620	3.2261	1.6876	24.2758	18.221	13.066	219.205	21.130	15.975	214.122
630	3.2250	1.6671	24.2524	18.527	13.289	219.695	21.465	16.257	214.707
640	3.2190	1.6469	24.2622	18.833	13.519	220.179	21.862	16.541	215.285
650	3.2074	1.6270	24.2152	19.141	13.736	220.656	22.280	16.828	215.856
660	3.2160	1.6072	24.2773	19.449	13.962	221.127	22.600	17.112	216.410
670	3.2048	1.5875	24.2397	19.757	14.187	221.593	22.945	17.395	216.957
680	3.2038	1.5684	24.2623	20.065	14.414	222.055	23.342	17.688	217.527
690	3.2031	1.5494	24.2952	20.378	14.641	222.505	23.714	17.978	218.071
700	3.2025	1.5305	24.2693	20.690	14.870	222.953	24.069	18.268	218.610
710	3.2022	1.5119	25.1368	21.002	15.099	223.398	24.460	18.560	219.142
720	3.2021	1.4934	25.2065	21.315	15.328	223.833	24.860	18.854	219.669
730	3.2022	1.4752	25.2755	21.628	15.558	224.265	25.216	19.146	220.199
740	3.2024	1.4572	25.3439	21.943	15.789	224.692	25.597	19.444	220.707
750	3.2029	1.4393	25.4117	22.258	16.022	225.115	25.977	19.741	221.215
760	3.2035	1.4217	25.4787	22.573	16.255	225.533	26.388	20.039	221.720
770	3.2044	1.4042	25.5452	22.890	16.488	225.947	26.751	20.339	222.221
780	3.2154	1.3869	25.6110	23.208	16.723	226.357	27.125	20.639	222.717
790	3.2165	1.3697	25.6762	23.526	16.957	226.762	27.510	20.941	223.207
800	3.2179	1.3527	25.7408	23.844	17.193	227.162	27.896	21.245	223.693
810	3.2194	1.3359	25.8046	24.164	17.429	227.559	28.294	21.549	224.174
820	3.2212	1.3194	25.8682	24.483	17.665	227.952	28.672	21.855	224.653
830	3.2230	1.3031	25.9311	24.803	17.902	228.339	29.062	22.162	225.125
840	3.2251	1.2870	25.9934	25.124	18.140	228.724	29.464	22.470	225.597
850	3.2273	1.2710	26.0551	25.446	18.379	229.106	29.866	22.779	226.057
860	3.2296	1.2552	26.1168	25.768	18.618	229.482	30.283	23.087	226.514
870	3.2320	1.2397	26.1785	26.091	18.858	229.855	30.709	23.409	226.968
880	3.2347	1.2243	26.2391	26.415	19.099	230.227	31.162	23.715	227.425
890	3.2376	1.2090	26.2998	26.740	19.341	230.593	31.626	24.029	227.875
900	3.2405	1.1940	26.3599	27.066	19.585	230.957	32.105	24.345	228.321
910	3.2435	1.1792	26.4196	27.392	19.830	231.317	32.628	24.662	228.763
920	3.2467	1.1646	26.4787	27.719	20.076	231.674	33.160	24.980	229.202
930	3.2500	1.1502	26.5374	28.046	20.314	232.028	33.682	25.300	229.637
940	3.2535	1.1359	26.5957	28.375	20.559	232.379	34.206	25.621	230.070
950	3.2571	1.1217	26.6544	28.703	20.805	232.727	34.741	25.943	230.499
960	3.2607	1.1076	26.7126	29.033	21.051	233.072	35.267	26.265	230.924
970	3.2645	1.0938	26.7706	29.362	21.298	233.413	35.803	26.588	231.347
980	3.2685	1.0801	26.8281	29.693	21.545	233.752	36.361	26.913	231.767
990	3.2726	1.0665	26.8850	30.024	21.793	234.088	36.921	27.240	232.184

Table A-23



A-22

(Continued)

[illegible]

(Continued)

Carbon Dioxide, CO <sub>2</sub> ( $\bar{Q}_T = -9.3520 \text{ kJ/mole}$ )			Carbon Monoxide, CO ( $\bar{Q}_T = -110.53 \text{ kJ/mole}$ )			Water Vapor, H <sub>2</sub> O ( $\bar{Q}_T = -241.820 \text{ kJ/mole}$ )			Oxygen, O <sub>2</sub> ( $\bar{Q}_T = 0 \text{ kJ/mole}$ )			Nitrogen, N <sub>2</sub> ( $\bar{Q}_T = 0 \text{ kJ/mole}$ )		
$\bar{h}$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}$	$\bar{h}$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}$	$\bar{h}$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}$	$\bar{h}$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}$	$\bar{h}$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}$
96.420	71.757	90.1543	56.736	42.123	233.998	76.335	35.302	288.151	36.000	4.4247	56.277	34.361	247.396	1760
97.012	72.640	90.7171	57.328	42.715	235.008	76.927	35.894	289.161	36.592	4.4735	56.869	34.953	248.398	1800
97.604	73.523	91.2829	57.920	43.307	236.018	77.519	36.486	290.171	37.184	4.5223	57.461	35.545	249.400	1840
98.196	74.406	91.8486	58.512	43.899	237.028	78.111	37.078	291.181	37.776	4.5711	58.053	36.137	250.402	1880
98.788	75.289	92.4144	59.104	44.491	238.038	78.703	37.670	292.191	38.368	4.6199	58.645	36.729	251.404	1920
99.380	76.172	92.9802	59.696	45.083	239.048	79.295	38.262	293.201	38.960	4.6687	59.237	37.321	252.406	1960
100.000	77.055	93.5460	60.288	45.675	240.058	79.887	38.854	294.211	39.552	4.7175	59.829	37.913	253.408	2000
100.600	77.938	94.1118	60.880	46.267	241.068	80.479	39.446	295.221	40.144	4.7663	60.421	38.505	254.410	2040
101.200	78.821	94.6776	61.472	46.859	242.078	81.071	40.038	296.231	40.736	4.8151	61.013	39.097	255.412	2080
101.800	79.704	95.2434	62.064	47.451	243.088	81.663	40.630	297.241	41.328	4.8639	61.605	39.689	256.414	2120
102.400	80.587	95.8092	62.656	48.043	244.098	82.255	41.222	298.251	41.920	4.9127	62.197	40.281	257.416	2160
103.000	81.470	96.3750	63.248	48.635	245.108	82.847	41.814	299.261	42.512	4.9615	62.789	40.873	258.418	2200
103.600	82.353	96.9408	63.840	49.227	246.118	83.439	42.406	300.271	43.104	5.0103	63.381	41.465	259.420	2240
104.200	83.236	97.5066	64.432	49.819	247.128	84.031	42.998	301.281	43.696	5.0591	63.973	42.057	260.422	2280
104.800	84.119	98.0724	65.024	50.411	248.138	84.623	43.590	302.291	44.288	5.1079	64.565	42.649	261.424	2320
105.400	85.002	98.6382	65.616	51.003	249.148	85.215	44.182	303.301	44.880	5.1567	65.157	43.241	262.426	2360
106.000	85.885	99.2040	66.208	51.595	250.158	85.807	44.774	304.311	45.472	5.2055	65.749	43.833	263.428	2400
106.600	86.768	99.7698	66.800	52.187	251.168	86.399	45.366	305.321	46.064	5.2543	66.341	44.425	264.430	2440
107.200	87.651	100.3356	67.392	52.779	252.178	86.991	45.958	306.331	46.656	5.3031	66.933	45.017	265.432	2480
107.800	88.534	100.9014	67.984	53.371	253.188	87.583	46.550	307.341	47.248	5.3519	67.525	45.609	266.434	2520
108.400	89.417	101.4672	68.576	53.963	254.198	88.175	47.142	308.351	47.840	5.4007	68.117	46.201	267.436	2560

Values in Tables A-25 are based on the JANAF Thermochemical Tables, NBS Monograph 5-17, 1971.

TABLE A-23

## Lampiran VI: Tabel A25 *Thermodynamics*

TABLE A-25 Thermochemical Properties of Selected Substances at 298K and 1 atm

Substance	Formula	Molar Mass, <i>M</i> (kg/kmol)	Enthalpy of Formation, $\bar{h}_f^\circ$ (kJ/kmol)	Gibbs Function of Formation, $\bar{g}_f^\circ$ (kJ/kmol)	Absolute Entropy, $\bar{s}^\circ$ (kJ/kmol · K)	Heating Values	
						Higher, HHV (kJ/kg)	Lower, LHV (kJ/kg)
Carbon	C(s)	12.01	0	0	5.74	32,770	32,770
Hydrogen	H <sub>2</sub> (g)	2.016	0	0	130.57	141,780	119,950
Nitrogen	N <sub>2</sub> (g)	28.01	0	0	191.50	—	—
Oxygen	O <sub>2</sub> (g)	32.00	0	0	205.05	—	—
Carbon monoxide	CO(g)	28.01	−110,530	−137,150	197.54	—	—
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub> (g)	44.01	−393,520	−394,380	213.69	—	—
Water	H <sub>2</sub> O(g)	18.02	−241,820	−228,990	188.72	—	—
Water	H <sub>2</sub> O(l)	18.02	−285,830	−237,180	69.98	—	—
Hydrogen peroxide	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	34.02	−136,310	−105,600	232.63	—	—
Ammonia	NH <sub>3</sub> (g)	17.03	−46,190	−16,590	192.33	—	—
Oxygen	O(g)	16.00	249,170	231,770	160.95	—	—
Hydrogen	H(g)	1.008	218,000	203,290	114.61	—	—
Nitrogen	N(g)	14.01	472,680	455,510	153.10	—	—
Hydroxyl	OH(g)	17.01	39,460	34,290	183.75	—	—
Methane	CH <sub>4</sub> (g)	16.04	−74,850	−50,790	188.16	55,510	50,020
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	26.04	226,730	209,170	200.85	49,910	48,220
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	28.05	52,280	68,120	219.83	50,300	47,160
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	30.07	−84,680	−32,890	229.40	51,870	47,480
Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g)	42.08	20,450	62,720	266.94	48,820	45,780
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	44.09	−103,850	−23,490	269.91	50,350	46,360
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	58.12	−126,150	−15,710	310.05	49,500	45,720
Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	72.15	−146,440	−8,200	348.40	49,010	45,350
Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g)	114.22	−208,450	17,320	463.67	48,260	44,790
Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (l)	114.22	−249,910	6,610	360.79	47,900	44,430
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)	78.11	82,930	129,660	269.20	42,770	40,580
Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> OH(g)	32.04	−200,890	−162,140	239.70	23,850	21,110
Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> OH(l)	32.04	−238,810	−166,290	126.80	22,670	19,620
Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(g)	46.07	−235,310	−168,570	282.59	30,590	27,720
Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(l)	46.07	−277,690	−174,890	160.70	29,670	26,800

Source: Based on JANAF Thermochemical Tables, NBS/NBS-77, 1971; Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties, NBS Tech. Note 270-3, 1968; and API Research Project 44, Carnegie Press, 1953. Heating values calculated.

## Lampiran VII: Tabel Low Heating Value

tps

Appendix 1 30

2. Which component do you take into account when you estimate the heating value of a gas?

Please give the value and the corresponding unit for the heating value you use for these components. The source of the data, if available, can be entered as a number referring to the source reference list below the tables.

Component	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
HHV	141878	10110	55534	51909	50328	49945
LHV	118494	10110	49915	47413	47150	46214
Unit	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
Data source #	1	1	1	1	1	1

Component	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
HHV	50378	48949			48556	
LHV	46290	46736			46679	
Unit	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
Data source #	1	1			1	

Component	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> OH
HHV	42293	42875		40626		33256
LHV	40562	40918		39420		31819
Unit	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
Data source #	1	1		1		1

Component	BTX	tar	light tar	heavy tar	black tar	Carbon
HHV			40826	47194		
LHV			38420	43811		
Unit	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
Data source #						

Component	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> N	NO	N <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	CS <sub>2</sub>	S <sub>8</sub>
HHV	22497	24680			16524	5142		1389
LHV	18528	23846			15201	5142		771
Unit	kJ/kg	kJ/kg			kJ/kg	kJ/kg		kJ/kg
Data source #	1	1			1	1		1

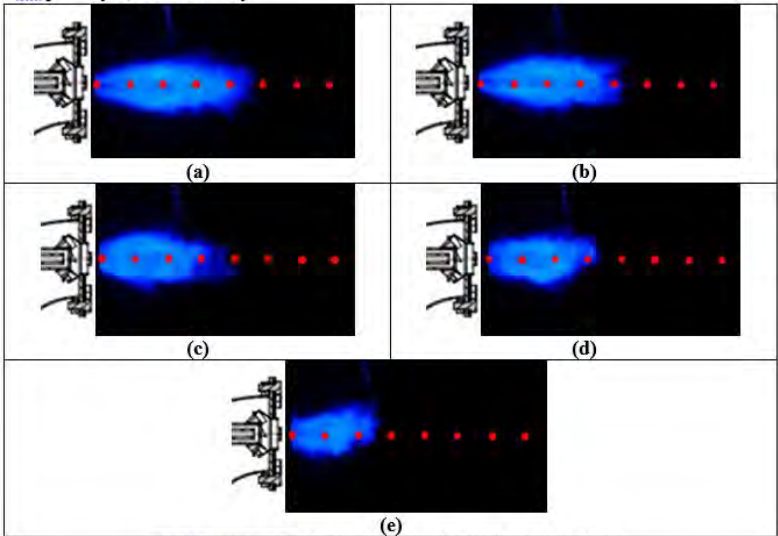
### List of references

Data source # 1	Perry, Green, Maloney: Perry's Chemical Engineers' Handbook 6 <sup>th</sup> Ed. New York, McGraw-Hill Book Company (1984).
Data source # 2	
Data source # 3	
Data source # 4	
Data source # 5	



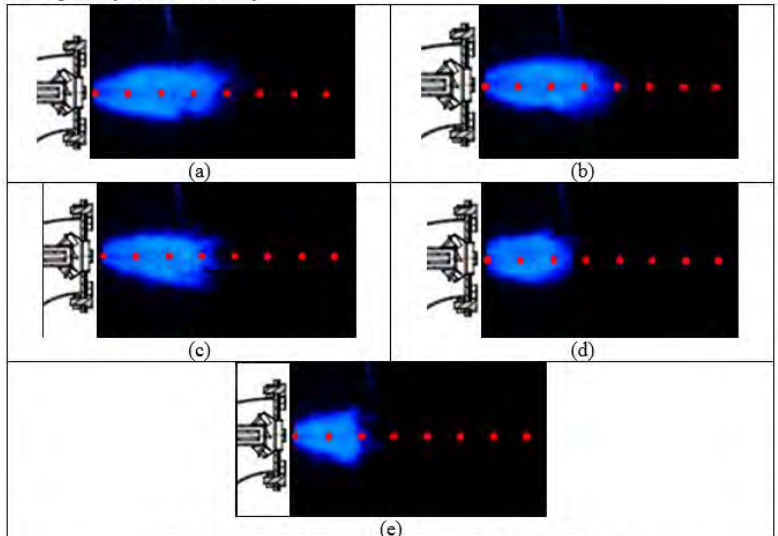
# Lampiran VIII: Visualisasi Nyala Api

0,03 primary 0,008 secondary



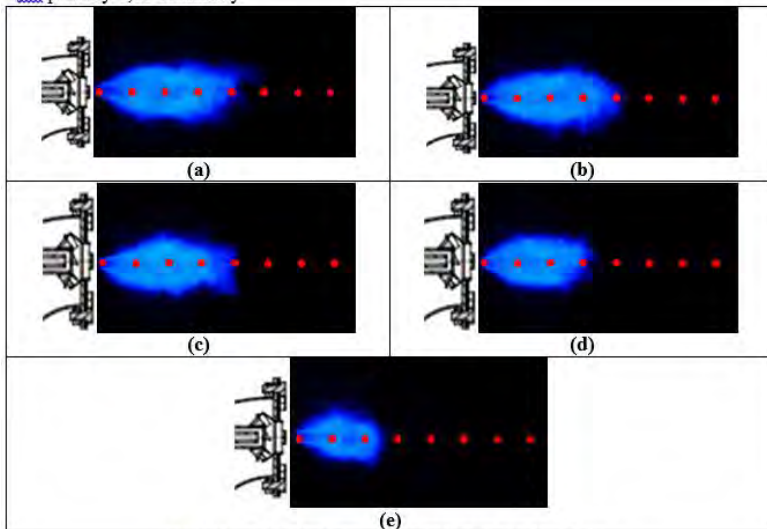
(a) 1 bar (b) 0.8 bar (c) 0.6 bar (d) 0.4 bar (e) 0.2 bar

0,025 primary 0,008 secondary



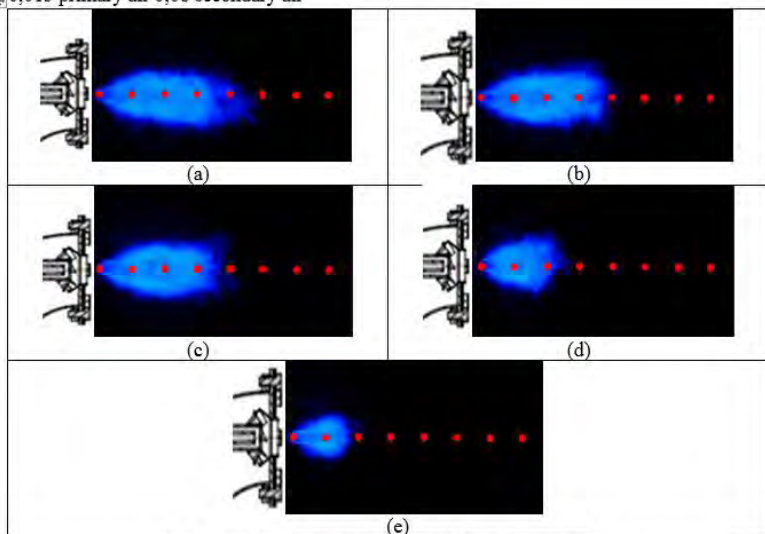
(a) 1 bar (b) 0.8 bar (c) 0.6 bar (d) 0.4 bar (e) 0.2 bar

0,02 primary 0,08 secondary



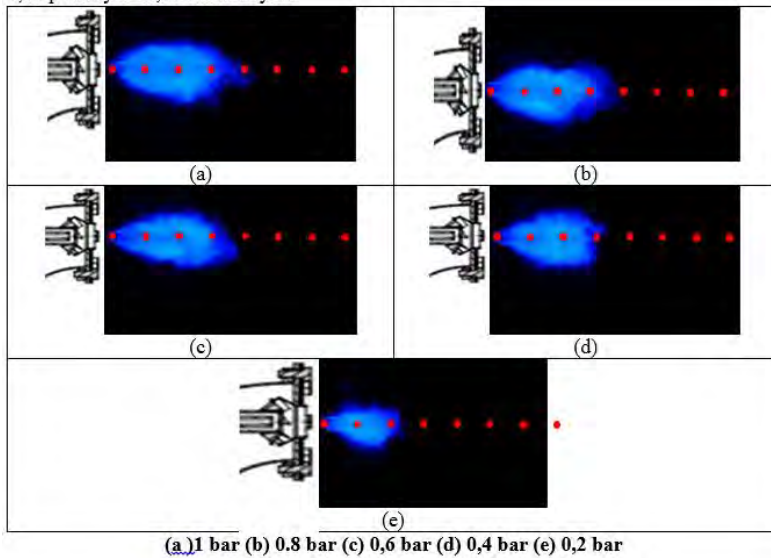
(a) 1 bar (b) 0.8 bar (c) 0,6 bar (d) 0,4 bar (e) 0,2 bar

0,015 primary air 0,08 secondary

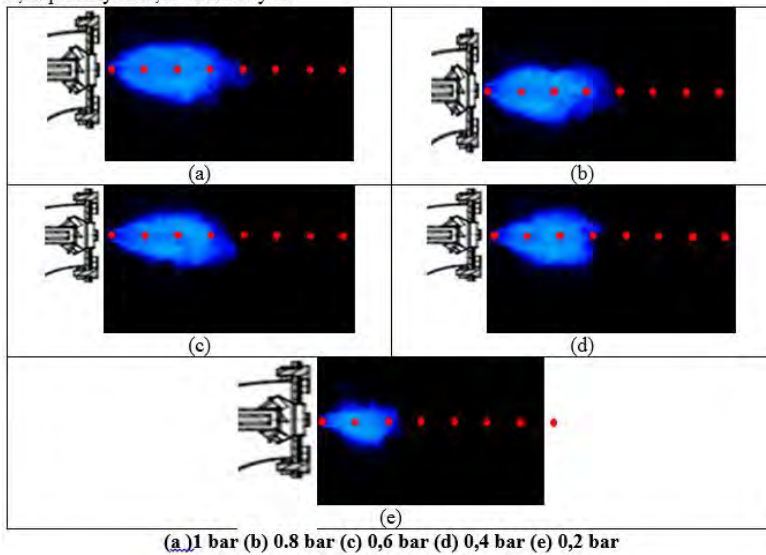


(a) 1 bar (b) 0.8 bar (c) 0,6 bar (d) 0,4 bar (e) 0,2 bar

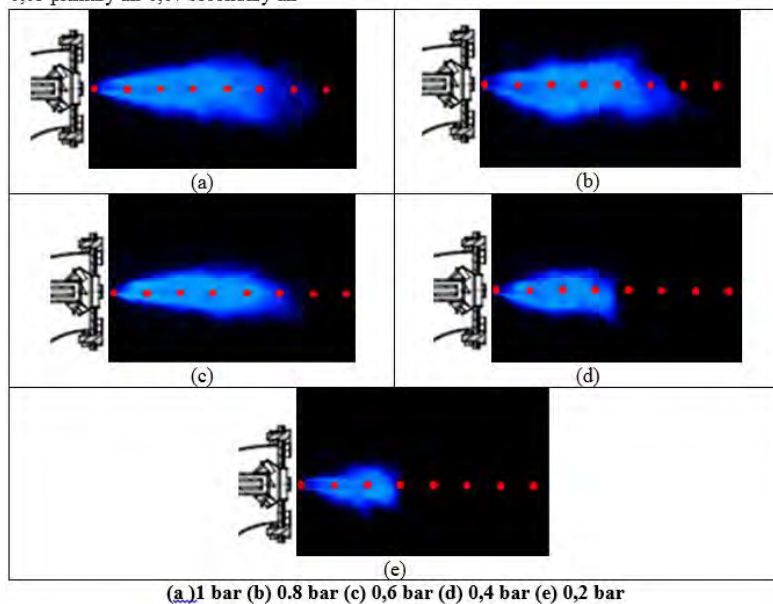
0,01 primary air 0,08 secondary air



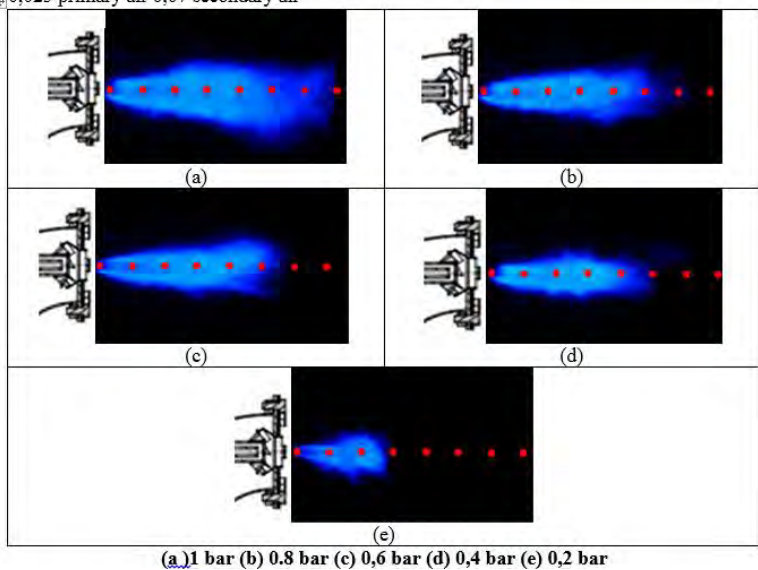
0,01 primary air 0,08 secondary air



0,03 primary air 0,07 secondary air

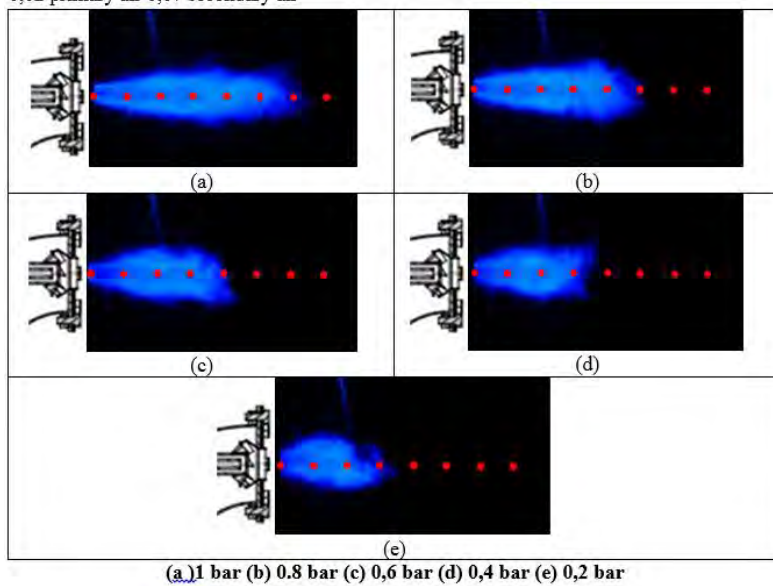


0,025 primary air 0,07 secondary air

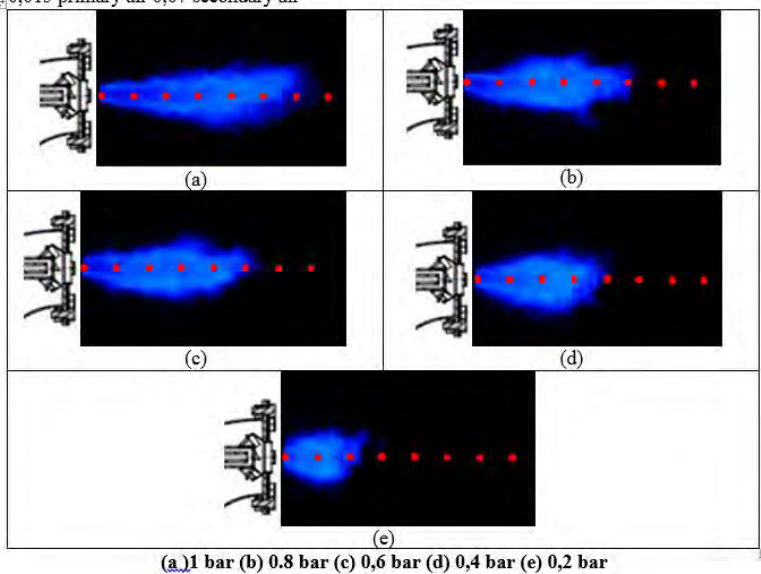




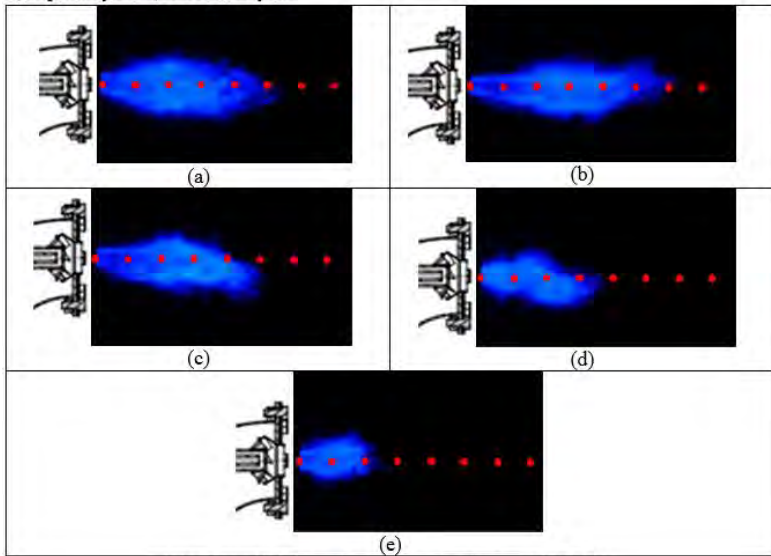
0,02 primary air 0,07 secondary air



0,015 primary air 0,07 secondary air

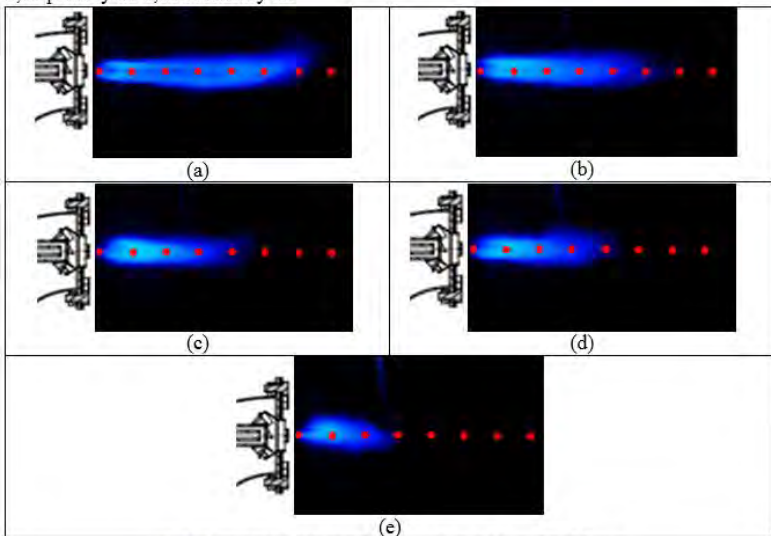


0,01 primary air 0,07 secondary air



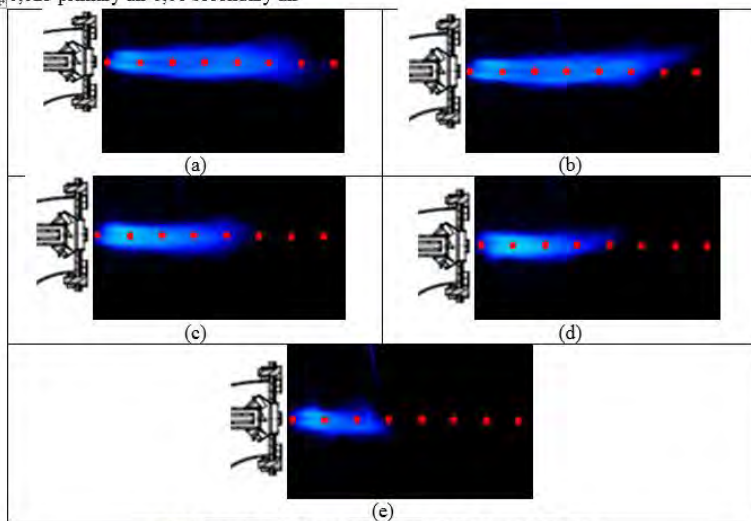
(a) 1 bar (b) 0.8 bar (c) 0.6 bar (d) 0.4 bar (e) 0.2 bar

0,03 primary air 0,06 secondary air



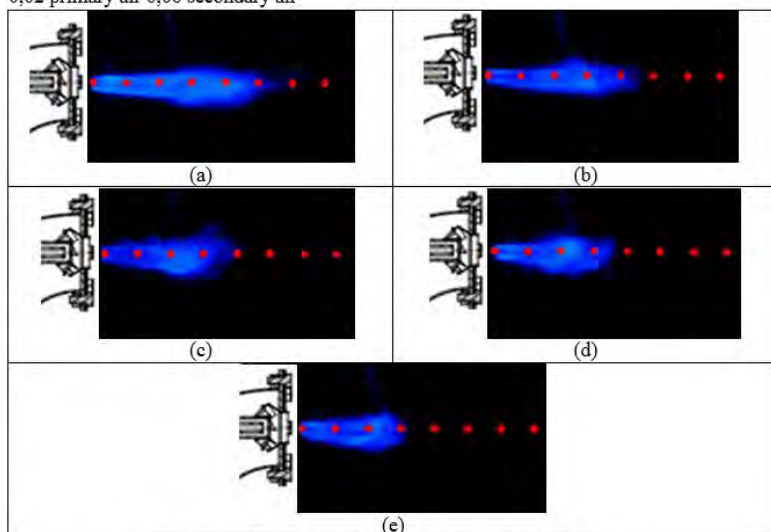
(a) 1 bar (b) 0.8 bar (c) 0.6 bar (d) 0.4 bar (e) 0.2 bar

0,025 primary air 0,06 secondary air



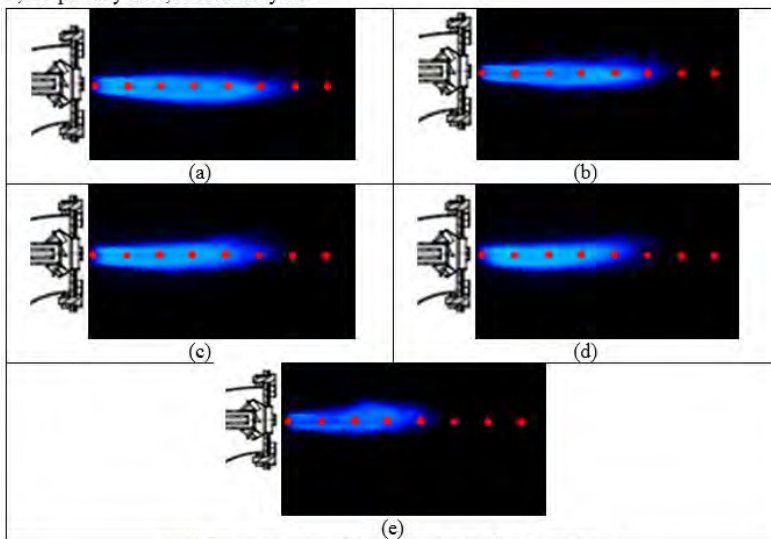
(a) 1 bar (b) 0.8 bar (c) 0.6 bar (d) 0.4 bar (e) 0.2 bar

0,02 primary air 0,06 secondary air



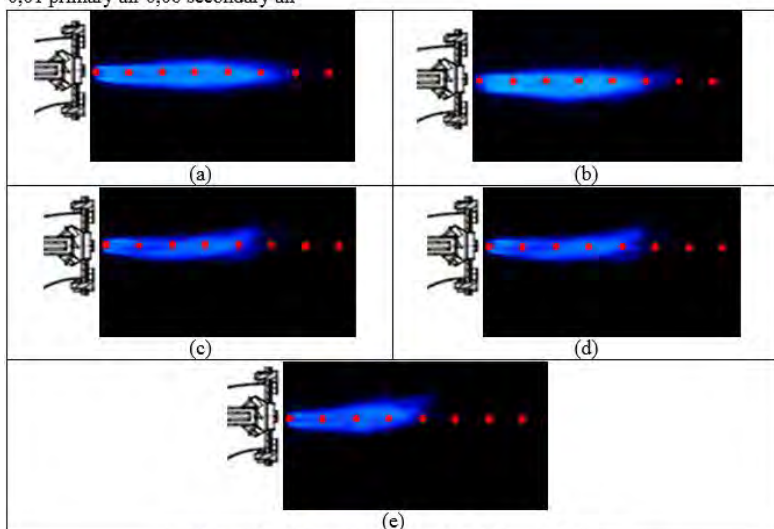
(a) 1 bar (b) 0.8 bar (c) 0.6 bar (d) 0.4 bar (e) 0.2 bar

0,015 primary air 0,06 secondary air



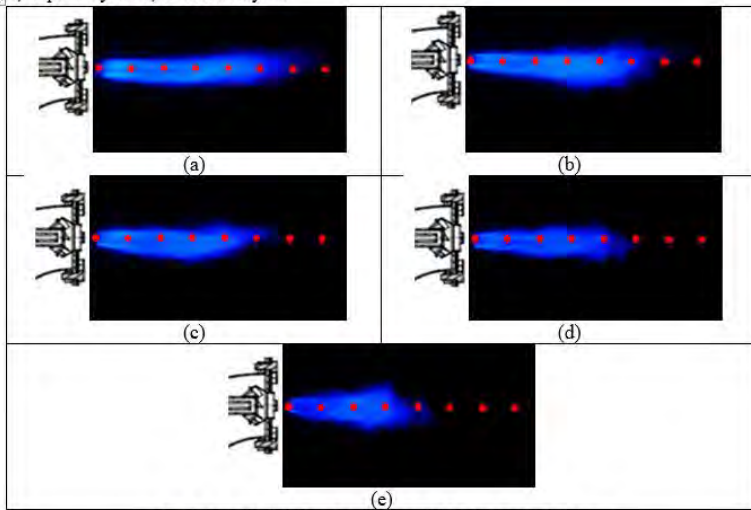
(a) 1 bar (b) 0,8 bar (c) 0,6 bar (d) 0,4 bar (e) 0,2 bar

0,01 primary air 0,06 secondary air



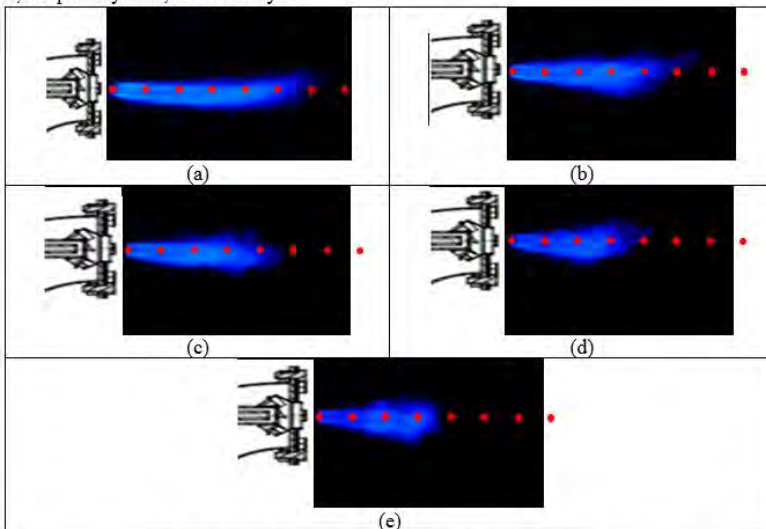
(a) 1 bar (b) 0,8 bar (c) 0,6 bar (d) 0,4 bar (e) 0,2 bar

0,03 primary air 0,05 secondary air



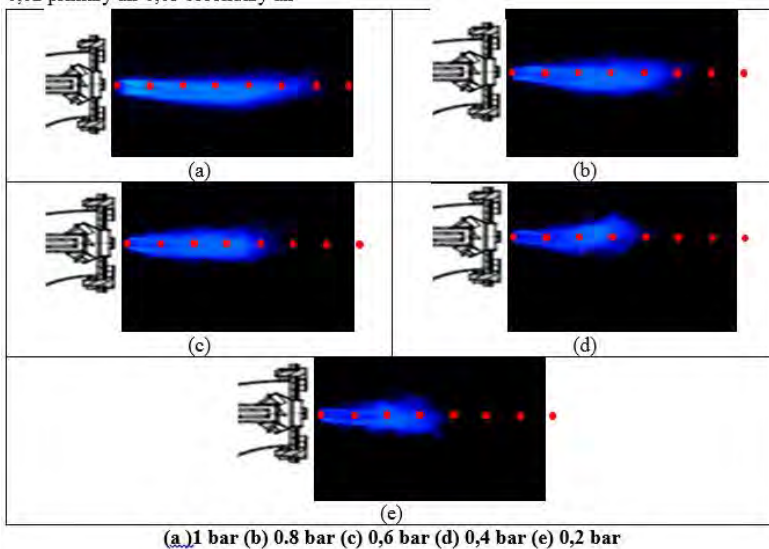
(a) 1 bar (b) 0,8 bar (c) 0,6 bar (d) 0,4 bar (e) 0,2 bar

0,025 primary air 0,05 secondary air

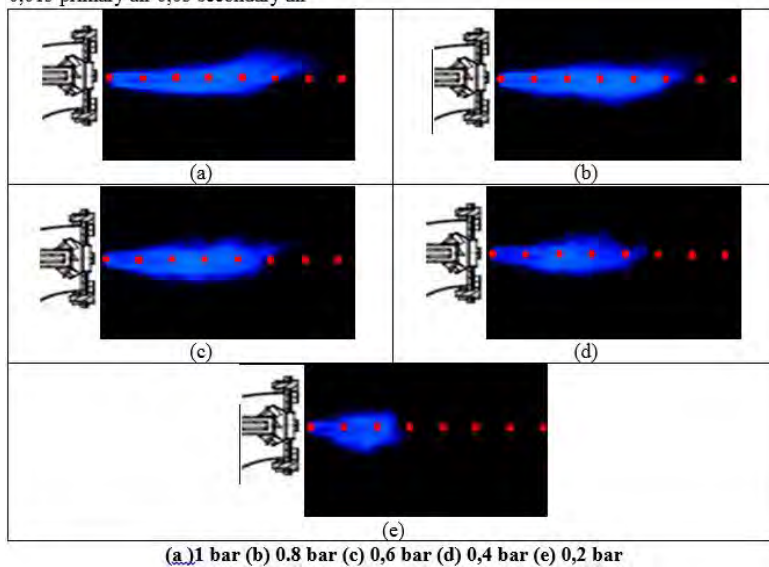


(a) 1 bar (b) 0,8 bar (c) 0,6 bar (d) 0,4 bar (e) 0,2 bar

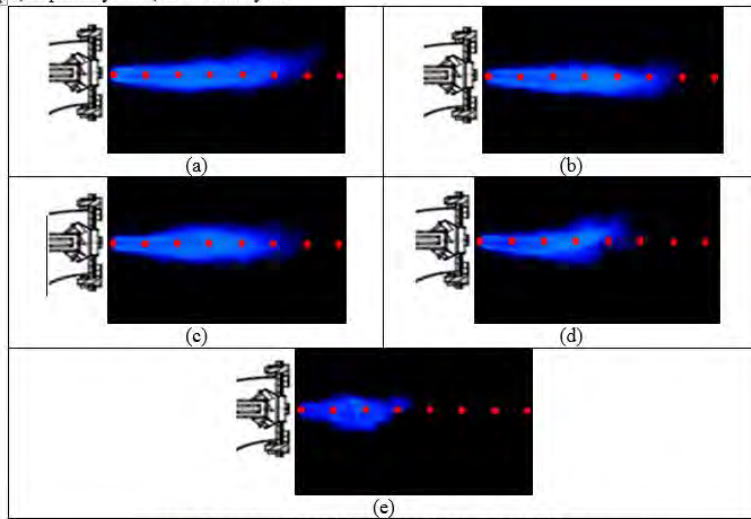
0,02 primary air 0,05 secondary air



0,015 primary air 0,05 secondary air

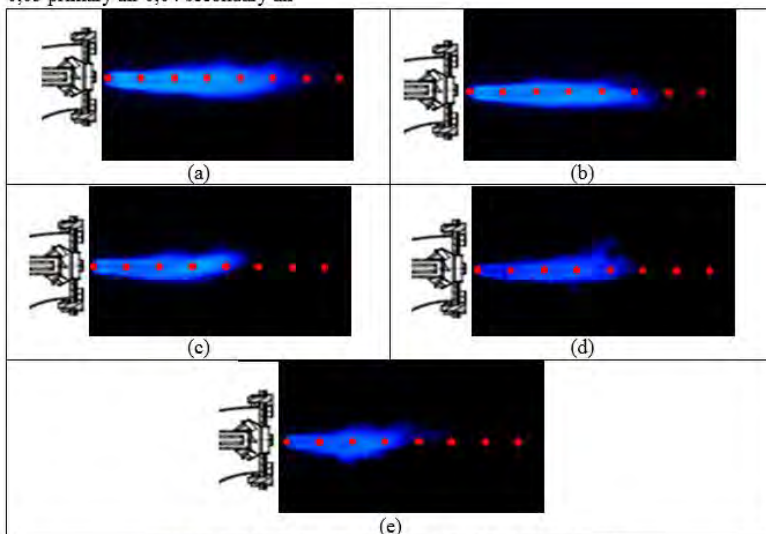


0,01 primary air 0,05 secondary air



(a) 1 bar (b) 0,8 bar (c) 0,6 bar (d) 0,4 bar (e) 0,2 bar

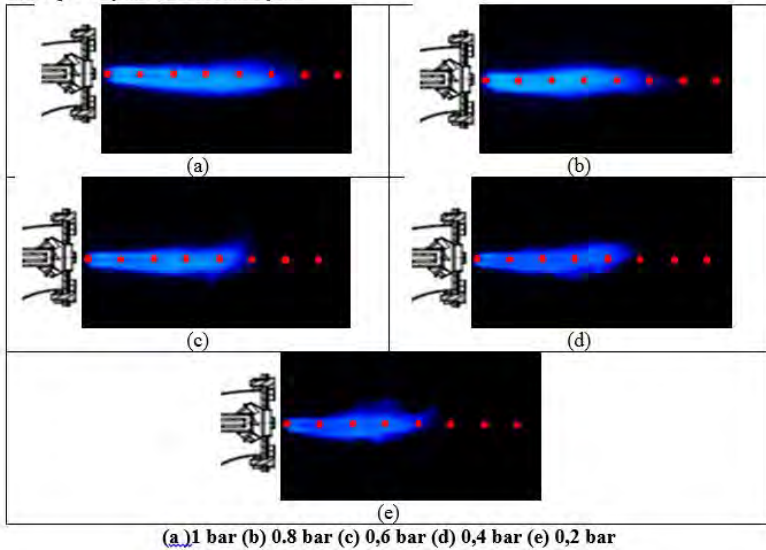
0,03 primary air 0,04 secondary air



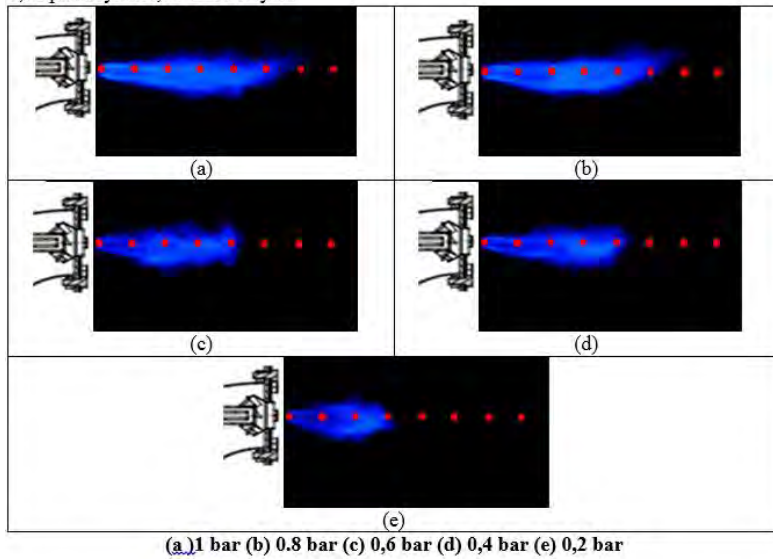
(a) 1 bar (b) 0,8 bar (c) 0,6 bar (d) 0,4 bar (e) 0,2 bar



0,025 primary air 0,04 secondary air

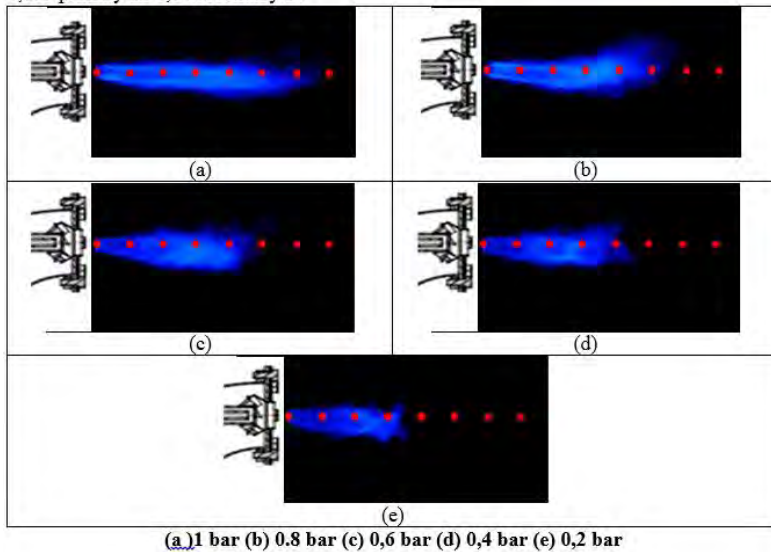


0,02 primary air 0,04 secondary air

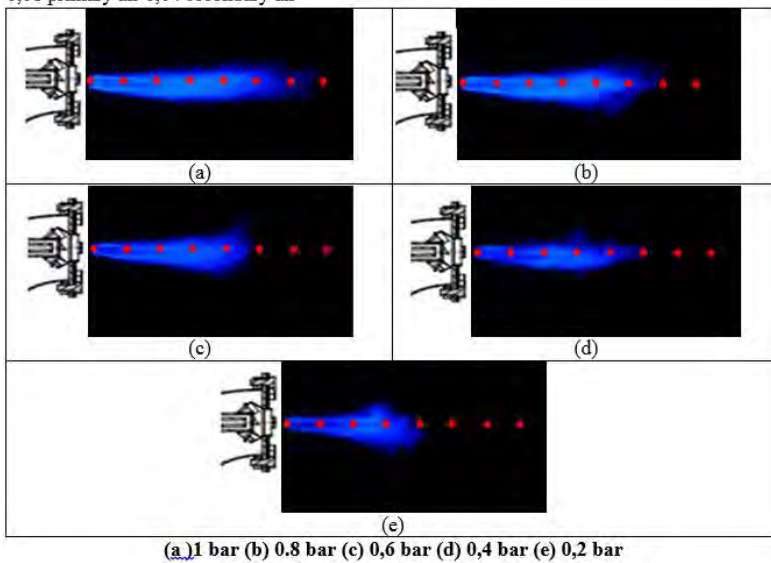




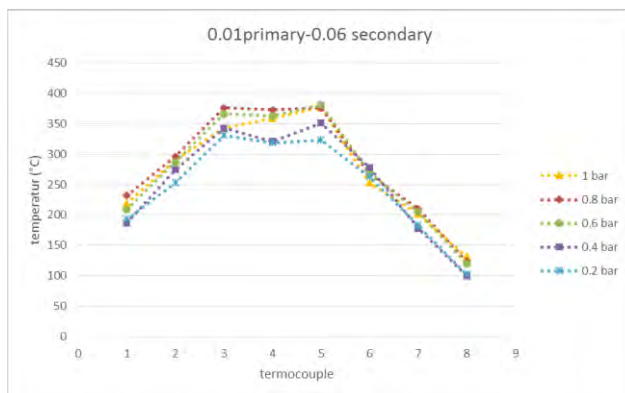
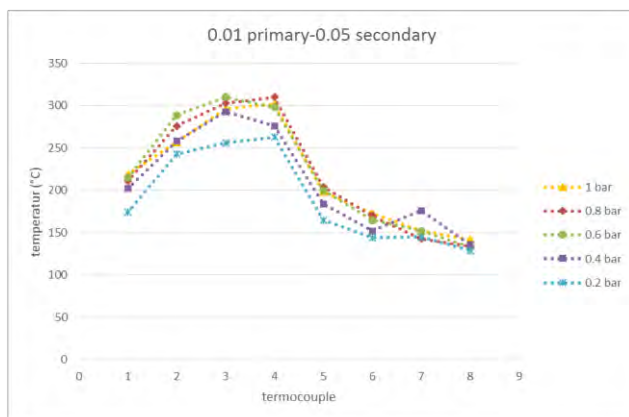
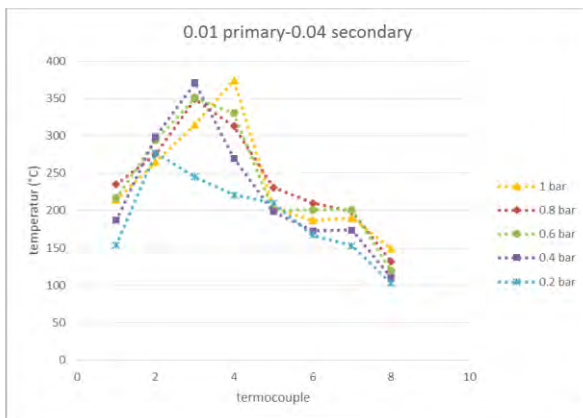
0,015 primary air 0,04 secondary air

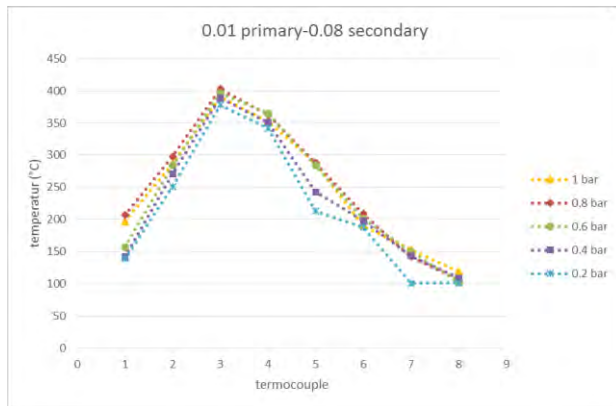
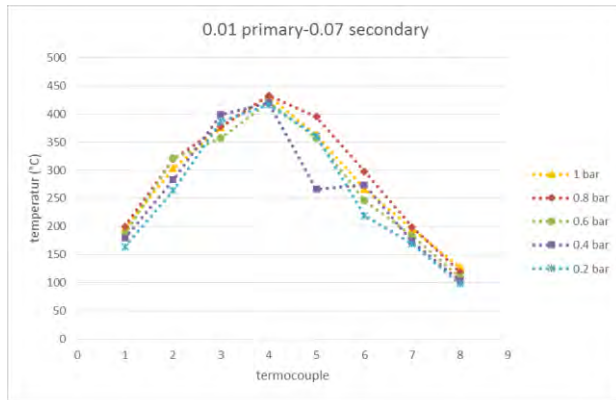


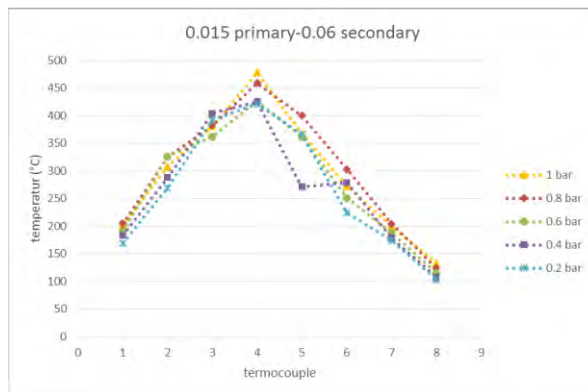
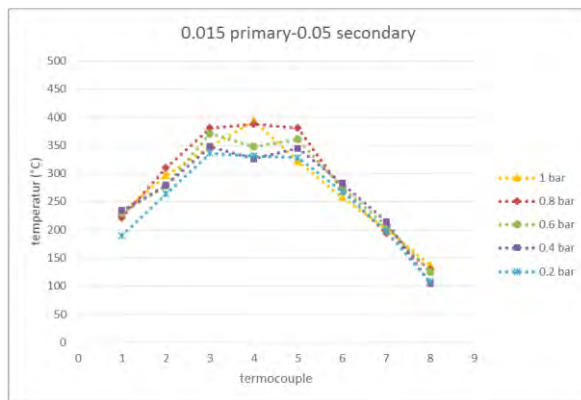
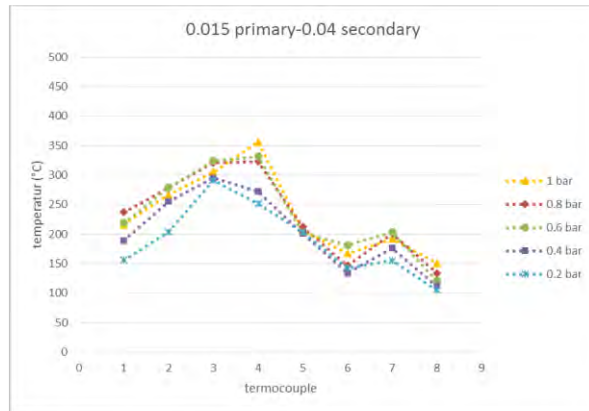
0,01 primary air 0,04 secondary air

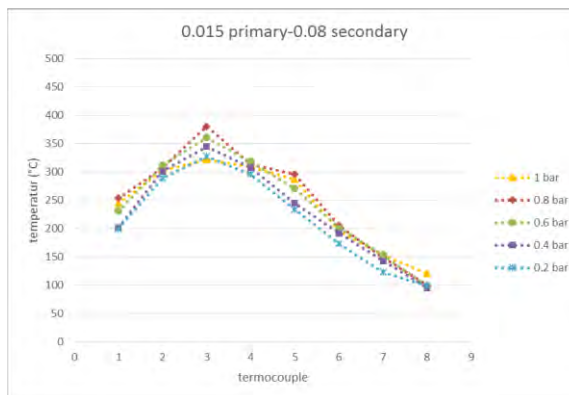
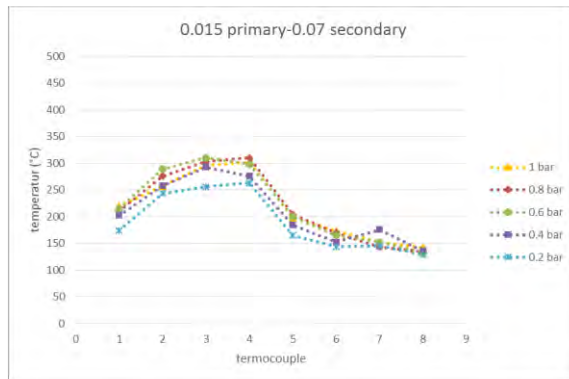


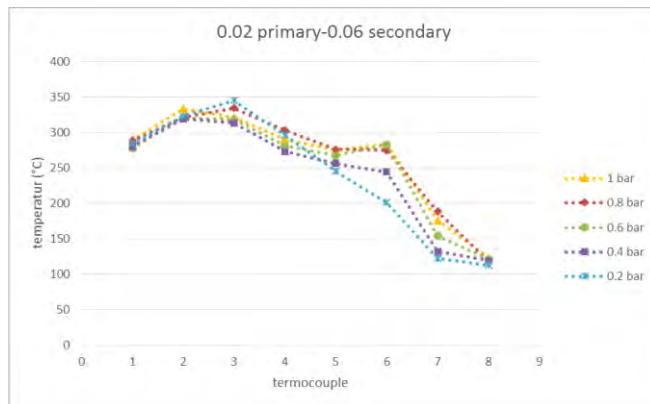
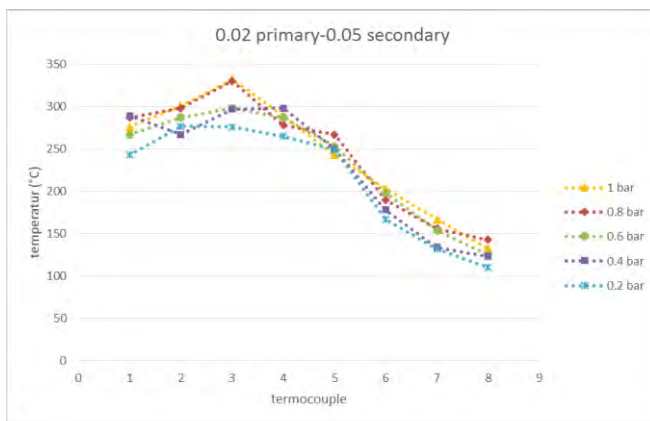
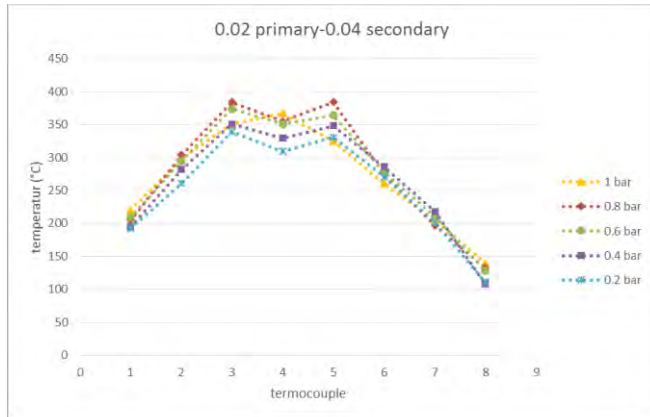
## Lampiran IX: Grafik temperatur burner

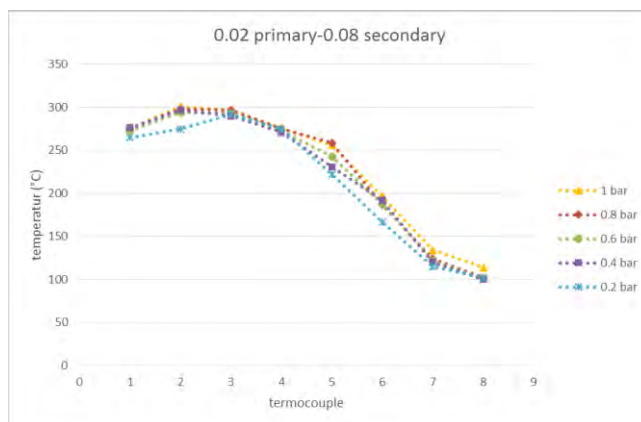
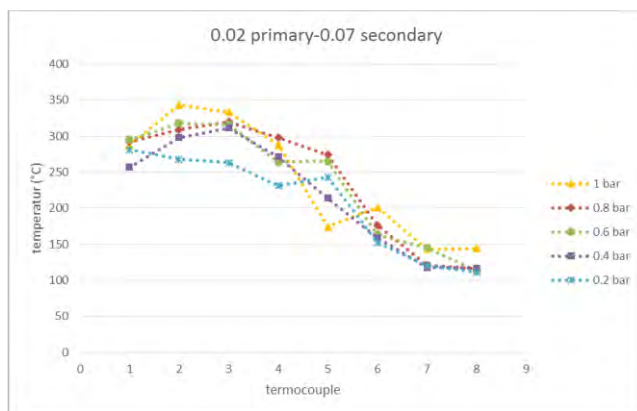


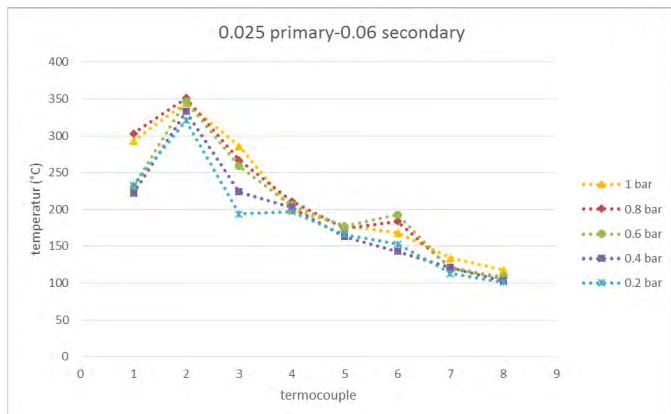
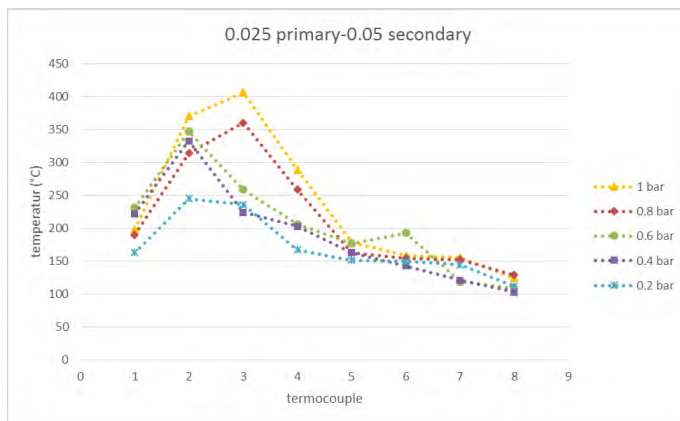
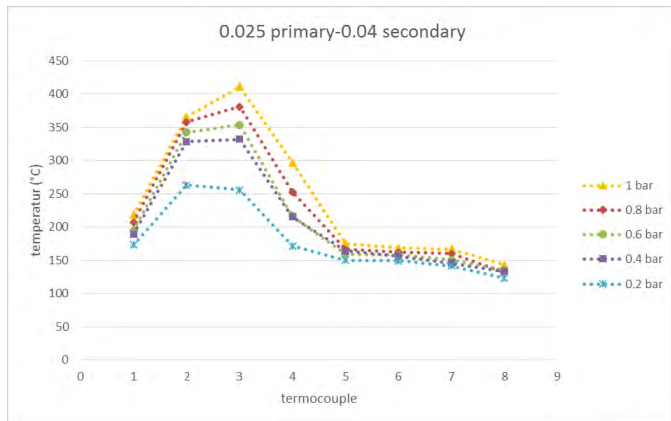




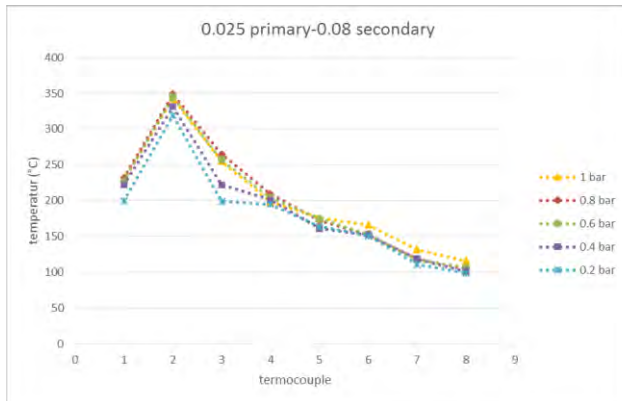
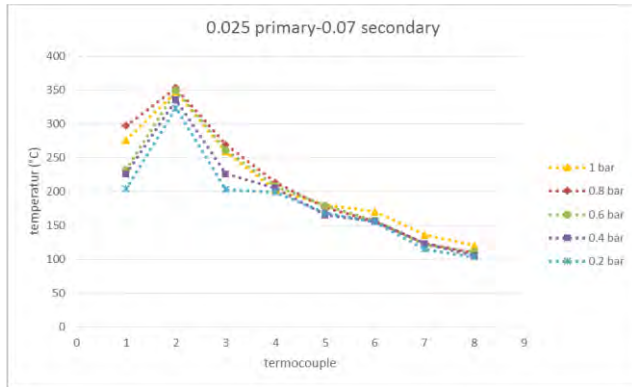


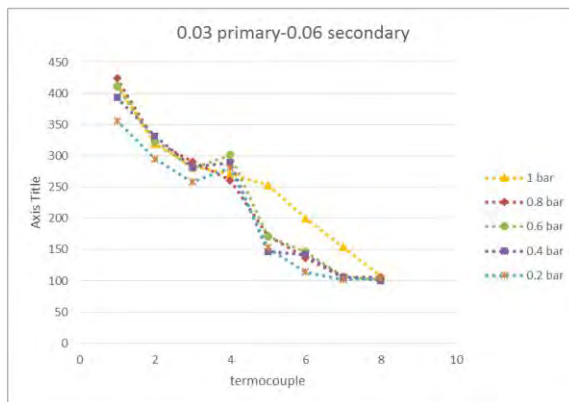
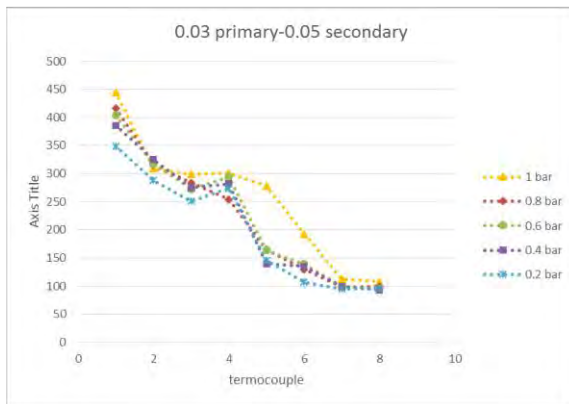
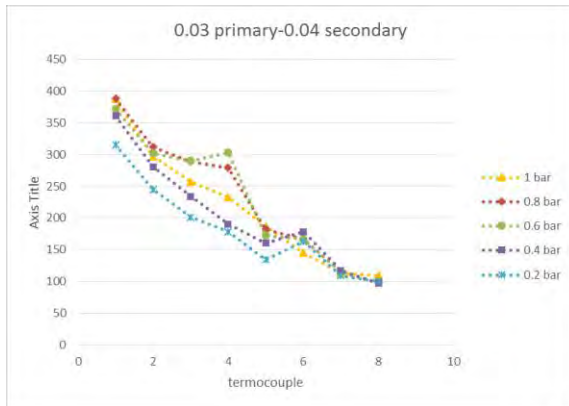


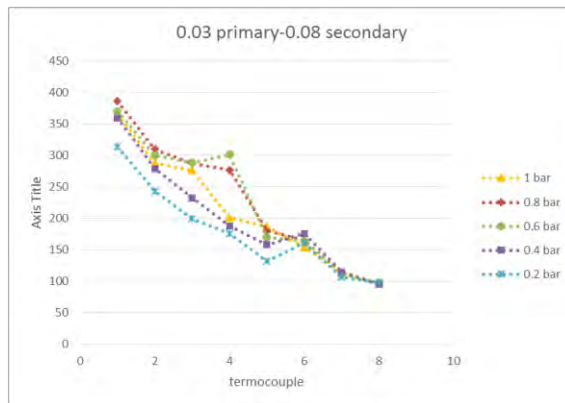
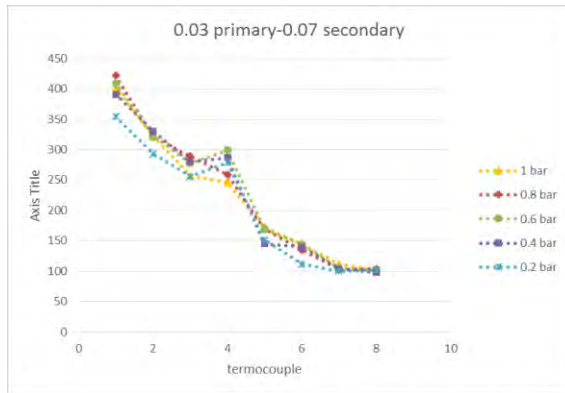




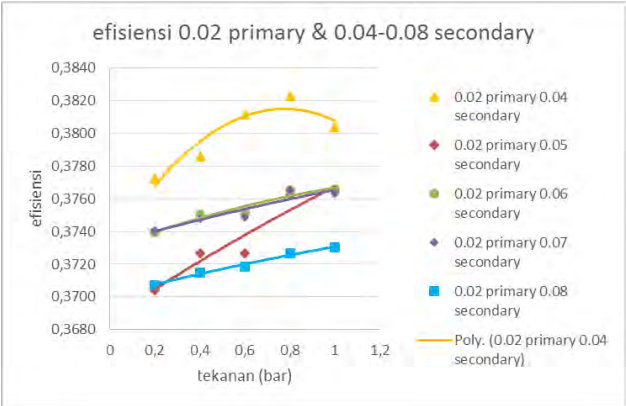
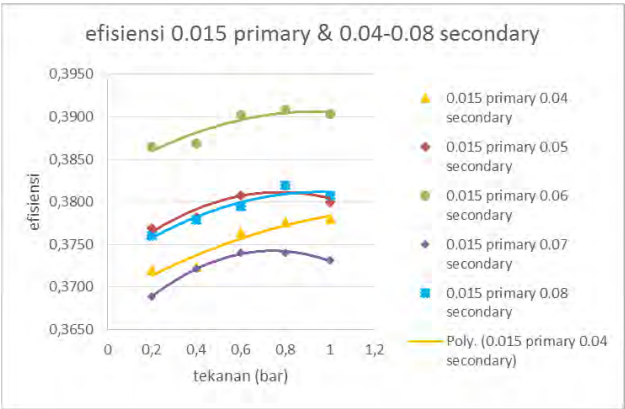
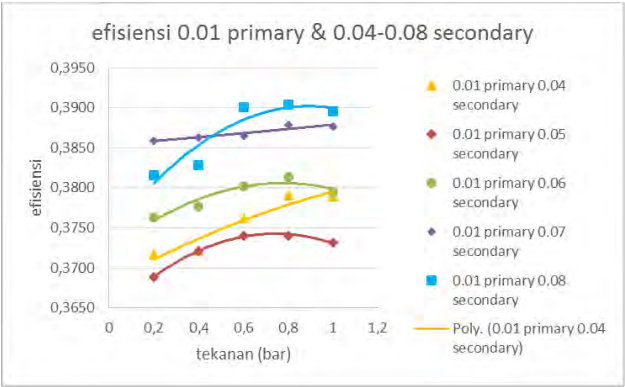


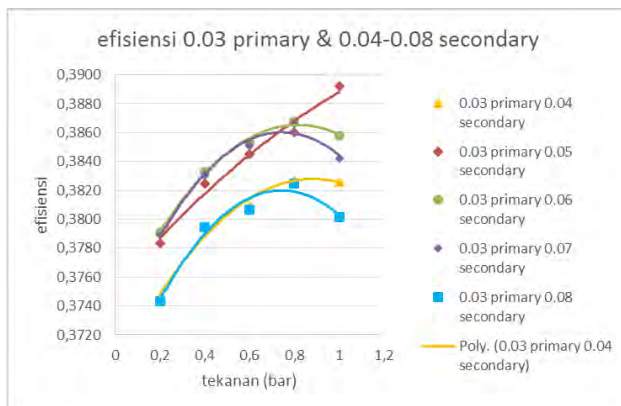
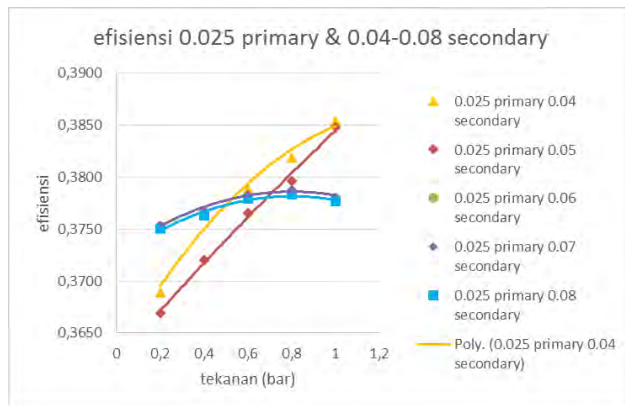




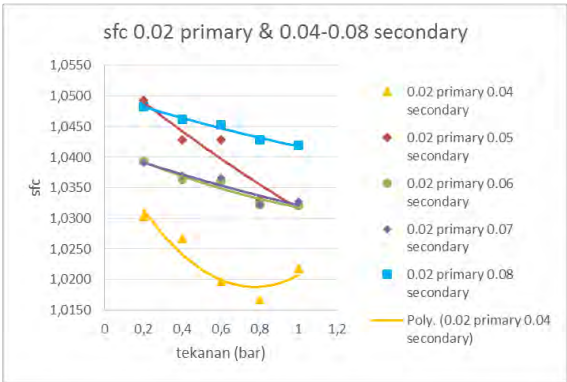
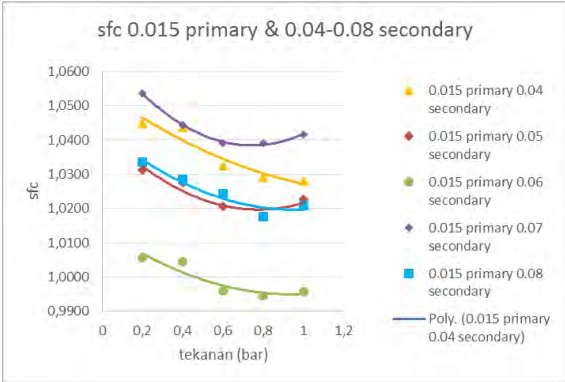
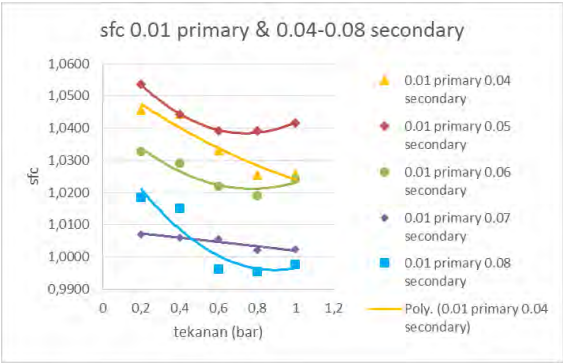


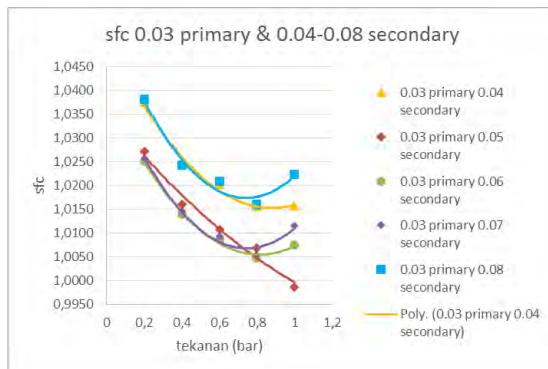
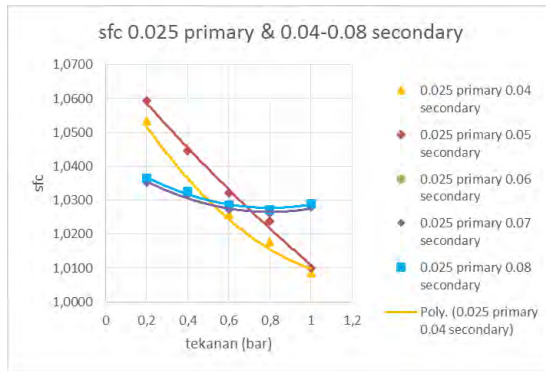
Lampiran X: Grafik efisiensi tiap burner





Lampiran XI: Grafik sfc tiap burner





## BIOGRAFI PENULIS



Berikut data diri penulis bernama Fitria Rachmawati, lahir di Nganjuk tanggal 4 April 1993, putri dari pasangan Bapak Drs. Moch. Syahroji dan Ibu Dra. Endang Iriani. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Jenjang pendidikan yang pernah di tempuh adalah SDN Penjaringan Sari I/271 Surabaya, SMP Negeri 23 Surabaya dan SMA Negeri 14 Surabaya.

Pada tahun 2013 penulis lulus dari Program D3 Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya. Kemudian penulis melanjutkan perkuliahan lintas jalur Jurusan S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya tahun 2013. Penulis mengambil bidang keahlian Konversi Energi dan mengambil Tugas Akhir dibidang Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar, yaitu - Karakterisasi Unjuk Kerja *Burner Gas Type Partially Premixed* Berbahan Bakar *Syngas* Biomassa Serbuk Kayu Dengan Variasi *Primary* Dan *Secondary Air*.

Selain itu penulis juga aktif di bidang keorganisasian di Himpunan Mahasiswa D3 Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri - ITS. Di Himpunan Mahasiswa D3 Teknik Mesin penulis mendapat amanah sebagai Anggota Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa 2011-2012 dan aktif dalam Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan bakar 2014 – 2016 di Jurusan S1 Teknik Mesin, ITS.

Semoga laporan Tugas Akhir penelitian ini bermanfaat bagi banyak masyarakat sekitar akan pentingnya sumber energi terbarukan, semoga dengan ini ilmu yang kita tempuh semoga bermanfaat seterusnya, mohon maaf apabila ada salah kata dalam penulisan laporan penelitian tugas akhir ini. Salam.

Alamat email : [fitriar.rachmawati105@gmail.com](mailto:fitriar.rachmawati105@gmail.com)